

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Trwałość połączeń spawanych wykonanych ze stali o pod-
wyższonej wytrzymałości – S690QL do S1100QL**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Fabian Żok

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Promotor pomocniczy: dr inż. Mateusz Kowalski

Opole 2022

Podziękowania:

Pragnę podziękować promotorowi mojej pracy prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej, cierpliwość i wyrozumiałość oraz motywację do krytycznego spojrzenia na problematykę badawczą. Szczególne podziękowania pragnę złożyć Panu Profesorowi za pomoc w jasnym formułowaniu myśli naukowej oraz inspirację do zgłębiania zagadnień naukowych.

Chciałbym również podziękować promotorowi pomocniczemu dr inż. Mateuszowi Kowalskiemu za poświęcony mi czas i pomoc podczas pisania, za cenne uwagi i krytyczne podejście do zmian i pomysłów oraz za ogromny entuzjazm.

Dziękuję dr hab. Mariusz Prażmowski za wieloletnią współpracę i pomoc przy realizacji moich badań naukowych, za ciekawe dyskusje i bezcenne sugestie.

Pragnę podziękować Panom Andrzejowi Nakoniecznemu oraz Bartłomiejowi Werakso, współwłaścicielom firmy Spółka AS, za umożliwienie napisania tej pracy, za wsparcie i pomoc przy jej realizacji.

Chciałabym również podziękować rodzinie oraz przyjaciołom, za nieustanne wsparcie oraz motywację. W szczególności dziękuję mojej Żonie Ewie i Teściom za cierpliwość i pomoc przy realizacji pracy oraz nigdy niegasnącą wiarę we mnie.

Dziękuję Rodzicom za trud wychowania i swobodę wyboru ścieżki zawodowej.

Pragnę również serdecznie podziękować wszystkim Kolegom i Koleżankom, którzy swoją pomocą i życzliwością przyczynili się do powstania tej pracy.

Dla Piotra i Magdaleny

Część badań finansowana w ramach projektu z Funduszy Europejskich:



Projekt „Przeprowadzenie badań przemysłowych i prac rozwojowych w Spółka AS Nankonieczny Andrzej Werakso Bartłomiej w celu opracowania i wdrożenia nowej technologii spajania materiałów i elementów konstrukcji wykorzystywanych w przemyśle i budownictwie” RPOP.01.01.00-16-0031/16 – 00 współfinansowany w ramach Działania 1.1 Innowacje w przedsiębiorstwach, w ramach I Osi priorytetowej Innowacje w Gospodarce, Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2014-2020

Wykaz ważniejszych oznaczeń:

A_5 – wydłużenie, %

CEV – równoważnik węgla, %

C_f – stała uzależniona od kategorii zmęczeniowej,

CI – inicjacja pęknięcia,

CP – propagacja pęknięcia,

D_{SC} – wartość referencyjna wytrzymałości zmęczeniowej przy $NC = 2$ miliony cykli,

D_{SD} – granica zmęczenia dla zakresów naprężeń o stałej amplitudzie przy liczbie cykli N_D ,

D_{SE}, Dt_E – równoważny zakres naprężeń o stałej amplitudzie związany z n_{ma} ,

D_{SL} – granica odcięcia dla zakresów naprężeń przy liczbie cykli N_L ,

F_y – granica plastyczności, MPa,

HRC – jednostka twardości w skali Rockwella,

HV – jednostka twardości w skali Vickersa,

J – energia pracy łamania,

m – nachylenie krzywej wytrzymałości zmęczeniowej,

N – liczba cykli,

R_e – granica plastyczności, MPa

R_m – granica wytrzymałości, MPa

S_R – zakres naprężeń,

t – grubość blach, mm,

t – temperatura, °C,

$t_{8/5}$ – czas schłodzenia z temperatury 800°C do 500°C,

γ_{FF} – współczynnik częściowy dla równoważnych zakresów naprężeń o stałej amplitudzie $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$,

Spis treści

1. Wprowadzenie	8
1.1. Przedstawienie zagadnień z zakresu stosowania stali wysokowytrzymałych.....	8
1.2. Omówienie wytrzymałości w odniesieniu do konstrukcyjnych stali drobnoziarnistych.....	9
1.3. Budowa metalograficzna.....	13
2. Wymagania stawiane złączom spawanym.....	18
2.1. Charakterystyka stali konstrukcyjnych.....	19
2.2. Metody łukowego łączenia stali.....	23
2.2.1. Ręczne spawanie łukowe elektrodą otuloną.	24
2.2.2. Spawanie łukowe drutem elektrodowym litym w osłonie gazu aktywnego.....	28
2.3. Przepisy i normy przedmiotowe dla połączeń spawanych	32
2.4. Wymagania dotyczące identyfikacji właściwości zmęczeniowych	36
2.4.1. Wymagania normy ASTM E466.....	36
2.4.2. Wytyczne przepisów budowlanych ANSI/AISC 360	38
2.4.3. Niemieckie przepisy DIN 50100	40
2.4.4. Normy międzynarodowe – ISO 1099	42
2.4.5. Przepisy europejskie Eurocode 3 – EN 1993.....	43
3. Zjawisko zmęczenia, przegląd literatury	45
3.1. Charakterystyki naprężeniowe.....	45
3.2. Wykresy odkształceniowe.....	47
3.3. Dane dostępne w normach i literaturze dla gatunków od S690 do S1100.	48
3.4. Dane dostępne w normach i literaturze dla złączy spawanych	50

3.5. Problematyka związana z naprężeniem własnym.....	56
3.6. Podsumowanie z przeglądu literatury	57
4. Cel i zakres pracy	58
4.1. Cel pracy	58
4.2. Zakres pracy	58
5. Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych	59
6. Właściwości mechaniczne złączy spawanych	66
6.1. Badania NDT - nieniszczące	67
6.2. Badania DT – niszczące.....	68
6.3. Wyniki badań wytrzymałościowych spoin	70
7. Badania zmęczeniowe	76
7.1. Stanowisko badawcze	76
7.2. Wyniki badań eksperymentalnych	77
7.2.1. Wyniki badań zmęczeniowych materiału bazowego S1100QL.....	77
7.2.2. Wyniki badań zmęczeniowych połączenia spawanego.	78
8. Badania naprężeń własnych	87
8.1. Metoda trepanacyjna.....	90
8.2. Stanowisko pomiarowe.....	94
8.3. Wyniki pomiaru naprężeń własnych	95
8.4. Analiza wpływu naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową złączy spawanych.....	97
8.4.1. Wpływ deformacji na rozkład naprężeń w złączu.....	97
8.4.2. Symulacja procesu spawania	100
9. Analiza wpływu parametrów spawania na wytrzymałość otrzymanych złączy spawanych.....	103

10. Wnioski oraz spostrzeżenia.....	108
11. Literatura	110
Streszczenie.....	117

1. Wprowadzenie

1.1. Przedstawienie zagadnień z zakresu stosowania stali wysokowytrzymałych.

Trwałość maszyn i konstrukcji jest pojęciem występującym w technice od momentu stworzenia przez człowieka pierwszej konstrukcji. Coraz to nowe struktury i maszyny wymagają ciągłego dążenia do udoskonalania sposobów wyznaczenia trwałości i jej poprawy. Na przestrzeni lat sposoby eksperymentalnych badań doświadczalnych w znacznym stopniu przyczyniły się do ulepszenia powstających konstrukcji i znacząco wpłynęły na sposób projektowania. Problematyka wytrzymałości eksploatacyjnej jest związana z szeregiem różnych zagadnień badawczych. Niewątpliwie jednym z najczęstszych powodów awarii lub zniszczeń maszyn i konstrukcji jest zjawisko zmęczenia materiałów [1].

W niniejszej pracy skupiono się na sprawdzeniu trwałości zmęczeniowej i wytrzymałości stali o podwyższonych wytrzymałościach zyskujących coraz większą popularność w przemyśle i budownictwie. Głównym celem pracy jest określenie wpływu parametrów spawania na degradację właściwości zmęczeniowych i wytrzymałościowych. Praca podzielona jest na jedenaście rozdziałów. W pierwszym rozdziale przedstawiono ogólne zagadnienia związane z wytwarzaniem i zastosowaniem stali. Rozdział drugi przedstawia charakterystyki stali, ich właściwości oraz charakteryzuje metody łączenia i badania złączy. Scharakteryzowane zostały również dostępne przepisy regulujące pod względem zmęczeniowym zastosowanie stali. W rozdziale trzecim poruszone zostaje tematyka zmęczenia dla zastosowanych stali w przeglądzie literaturowym. Przegląd rozdzielono z podziałem na badania materiałowe i badania złączy. W rozdziale czwartym przedstawiono cel i zakres pracy. W rozdziałach piątym przedstawiono wyniki badań materiałów podstawowych. W rozdziale szóstym zamieszczone są wyniki badań złączy spawanych. W siódmym i ósmym zamieszczone są wyniki badań zmęczeniowych i pomiarów naprężeń własnych. Rozdział 9 zawiera analizę statystyczną wyników wytrzymałościowych. Pozostałe rozdziały zawierają podsumowanie, wnioski, streszczenie oraz literaturę.

1.2. Omówienie wytrzymałości w odniesieniu do konstrukcyjnych stali drobnoziarnistych

Jednym z pierwszych którzy zwrócili uwagę na potrzebę usystematyzowania podziału i jakości wyrobów stalowych był August Wöhler. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano zależność pomiędzy poziomem obciążenia a uzyskiwaną trwałością zmęczeniową próbek [2]. Postulował pod koniec XIX w. powołanie instytutów które miałyby za zadanie kontrolę wyrobów. Podział miałby się odbywać na podstawie wytrzymałości oraz wydłużenia.

Wiele materiałów konstrukcyjnych zostało już w znacznym stopniu sprawdzonych pod kątem różnych typów obciążeń – jako przykład mogą posłużyć stale konstrukcyjne w gatunku S235 czy S355. Stały rozwój metod wytwarzania materiałów konstrukcyjnych powoduje konieczność poszerzania wiedzy z zakresu właściwości eksploatacyjnych. Identyfikacja zjawisk degradacyjnych zachodzących w nowych grupach materiałów konstrukcyjnych np. w warunkach obciążeń losowych jest zagadnieniem znacznie wpływającym na bezpieczeństwo układów maszynowych. Od pierwszych badań wynikłych przez progres w konstrukcji maszyn jest na dziś wymuszony nie tylko z chęci tworzenia urządzeń lepszych, o większych zdolnościach pracy, ale w coraz większej mierze kwestie ekologiczne stają się bardziej istotne jak także ekonomia i racjonalne wykorzystanie surowców. Przytaczając przykład żurawi samochodowych, konstrukcje uznawane dekadę temu jako nowoczesne zostają przyćmione przez współczesne maszyny o tej samej masie przewyższające starsze konstrukcje zdolnościami transportowymi jak i zasięgiem pracy, zachowując podobną masę własną lub nacisk na oś. Kluczem do tego sukcesu stały się stale konstrukcyjne o podwyższonej granicy plastyczności UHSS. Materiały te pozwalają na zaoszczędzenie do ok. 60% materiału stosując stal klasy S1100 [3] w stosunku do stali S355 a w odniesieniu do S235 prawie o 80%. Stosowanie stali o podwyższonej wytrzymałości ma również swoje uzasadnienie ekonomiczne. Koszt tych materiałów jest nieznacznie wyższy niż standardowych stali konstrukcyjnych, jednak korzyści płynące z ich zastosowania mają wymierny wpływ na całkowity koszt konstrukcji. Oszczędności są nie tylko w materiałach podstawowych, również procesy spawalnicze będą generowały niższe koszty z uwagi na mniejszą ilość

potrzebnych materiałów spawalniczych jak i czasu potrzebnego na wykonanie poprawnych złączy.

Jako wady materiałów o podwyższonej wytrzymałości można wskazać stosowanie materiałów o podwyższonej wytrzymałości mogą być wyższe poziomy naprężeń własnych czy brak możliwości przeprowadzenia obróbki cieplnej po procesie spawania. Obecnie dostępne grubości oferowane przez producentów to od 3 do 200 mm dla gatunków S460 do S690 oraz do 125 mm dla gatunków S890 i S960. Stale o wyższej granicy plastyczności jak S1100 czy S1300 nie są ujęte w normie i ich grubości są uzależnione od możliwości wytwórczych producentów. Najczęściej gatunek S1100 oferowany jest do grubości 40 mm a S1300 tylko do 15 mm. Zdolnych do wytworzenia materiałów w tych gatunkach są np. przedsiębiorstwa SSAB, Thyssen Krupp oraz Dillinger Huette [4]–[6].

Wzrost wymagań odnoszących się do bezpieczeństwa konstrukcji spowodował konieczność poszerzenia wiedzy dotyczącej zjawisk oraz mechanizmów wpływających na trwałość eksploatacyjną nowych typów materiałów. Stawia to coraz wyższe wymagania dla materiałów podstawowych i to wymusza szczegółowe poznanie mechanizmów powodujących obniżenie trwałości a w ekstremalnych przypadkach prowadzących do zniszczenia.

Stale ulepszane cieplnie znajdują zastosowanie szczególnie w przemyśle produkujących maszyny do robót ziemnych, górnicze (rys.1) czy żurawie samojezdne (rys. 2; 3) bądź stacjonarne (rys.4). Coraz częściej również są stosowane na konstrukcje mostowe bądź w budownictwie. Trwałość takich konstrukcji jest wprost związana z określeniem minimalnej trwałości zmęczeniowej. W zależności od wielu czynników tj. grubości stosowanych materiałów, gatunku materiałów podstawowych i spawalniczych oraz proces spawania a wraz z nim ilości wprowadzonego do złącza ciepła trwałość zmęczeniowa może znacząca się różnić.



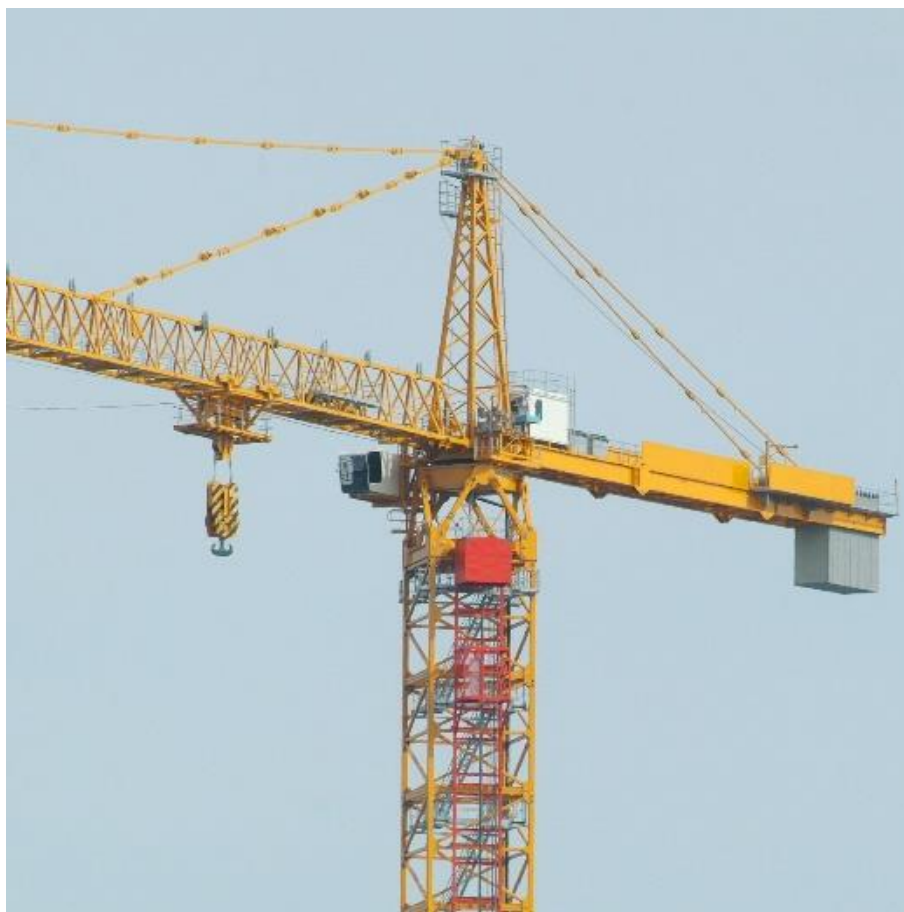
Rysunek 1. Ciężki pojazd transportowy Liebherr T284 [7]



Rysunek 2. Żuraw samojezdny Liebherr LTM 1500-8.1 [8]



Rysunek 3. Żuraw samojezdny Liebherr LTM 1030-2.1 [9]



Rysunek 4. Żuraw Liebherr 4000 HC 80 [10]

Jednak również w budownictwie – rys 5, znajdują coraz szersze zastosowanie z uwagi na swoje właściwości wytrzymałościowe. Najwyższym stosowanym gatunkiem,

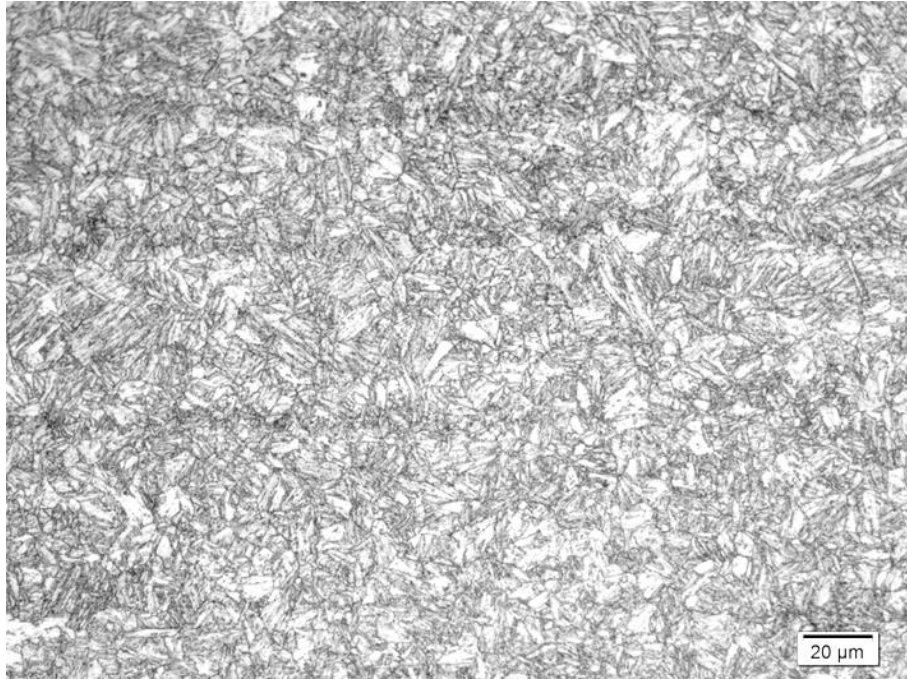
póki co jest S690. Związane to jest również z uwarunkowaniami normatywnymi [11], [12], ale również często z ograniczeniami montażowymi na budowie.



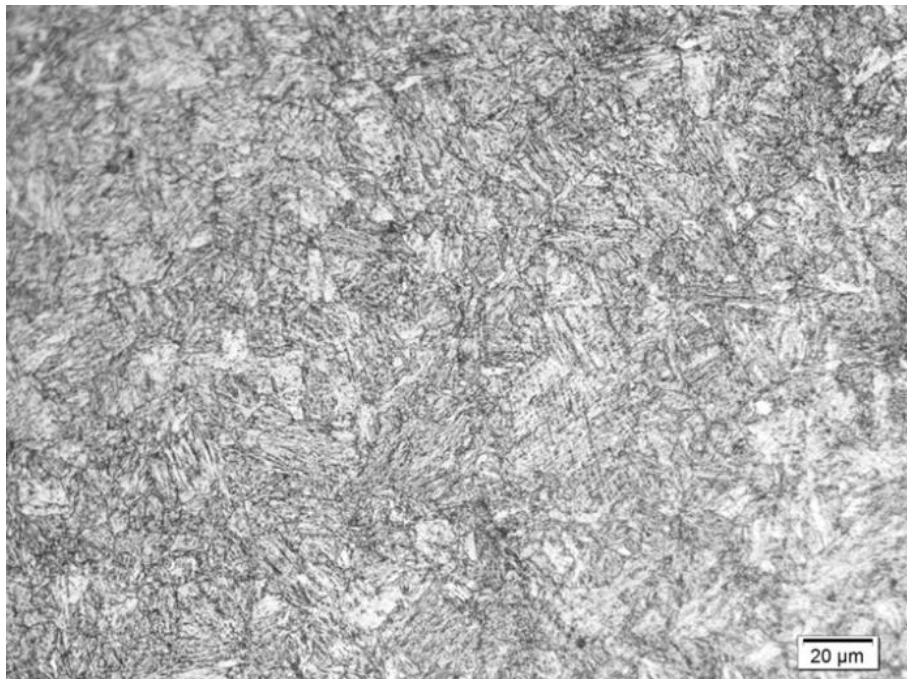
Rysunek 5. Wiadukt Millau [13]

1.3. Budowa metalograficzna

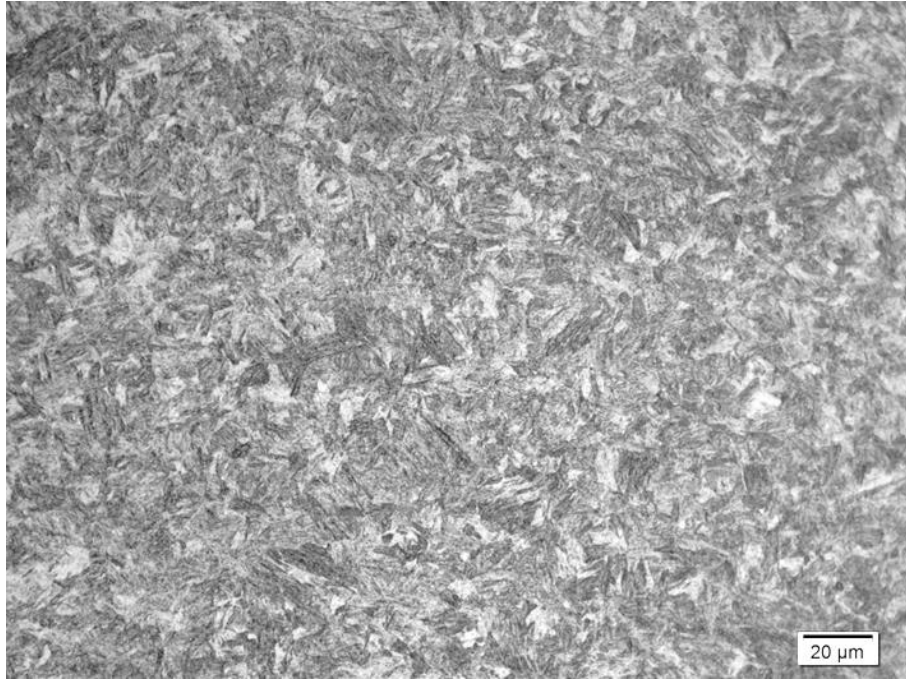
Wszystkie gatunki stali mają wspólny mianownik a jest nim żelazo. Zależnie od sposobu definiowania stal można przedstawić jako materiał zawierający masowo więcej żelaza niż innych składników oraz poziom węgla jest mniejszy niż 2 %. Taka definicja jest podana w normie PN EN 10020 [14]. W metalografii dominuje definicja, iż stal to roztwór żelaza i innych pierwiastków stopowych o zawartości węgla nie przekraczającej 2,11% przeznaczona do przeróbki plastycznej [15], [16]. Bazą tych informacji jest stabilny układ dwufazowy żelazo-węgiel. Powyżej tej granicznej zawartości węgla występują żeliwa. W praktyce a w szczególności w przemyśle stosuje się stopy wieloskładnikowe z ogólnym podziałem na stale nisko i wysokostopowe. Wprowadzając odpowiednie ilości pierwiastków stopowych można decydować o właściwościach późniejszego stopu. Jednak sam skład chemiczny nie determinuje cech wytrzymałościowych końcowego produktu. Poprzez właściwy proces produkcyjny można uzyskać stal o skrajnie różnych właściwościach wytrzymałościowych. Składają się na to proces walcowania, grzania i chłodzenia. Będzie to miało bezpośrednie odzworowanie na strukturze metalograficznej oraz właściwościach wyrobu.



Rysunek 6. Struktura materiału rodzimego stali S690QL



Rysunek 7. Struktura materiału rodzimego stali S890QL



Rysunek 8. Struktura materiału rodzimego stali S110QL

Podział na temperaturę obróbki plastycznej z uwagi na temperaturę rekrytalizacji stali [16]:

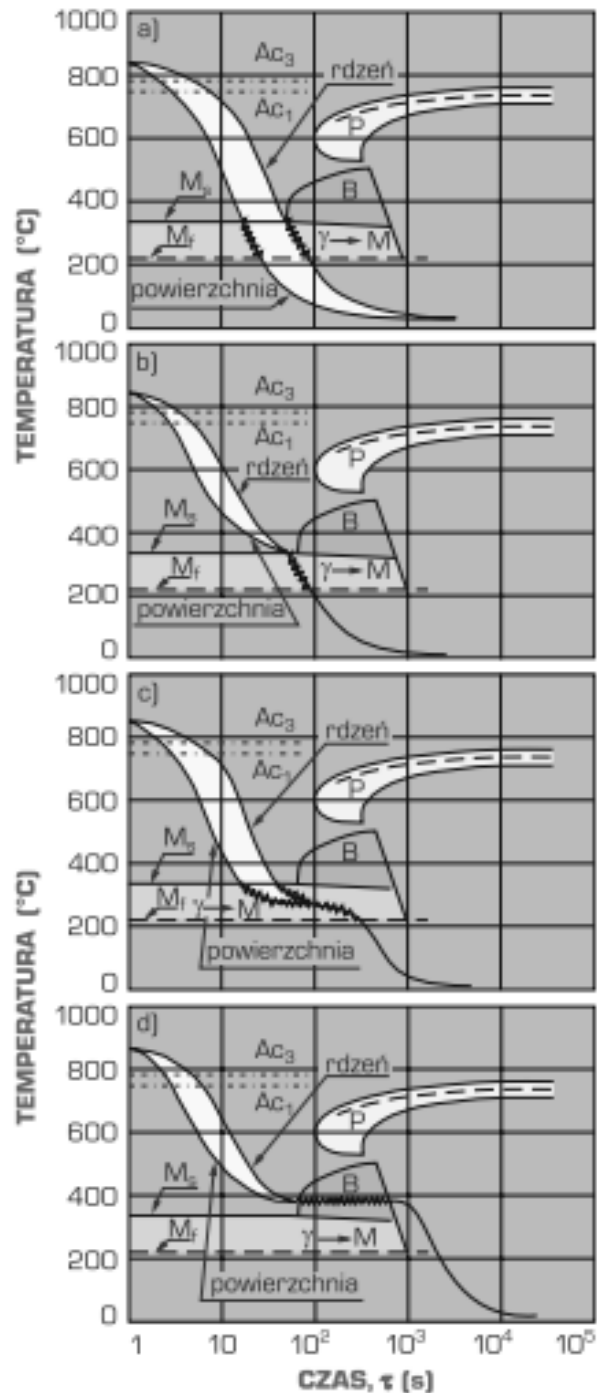
- wysokotemperaturową,
- niskotemperaturową.

Wysokotemperaturowa przeróbka plastyczna zachodzi powyżej temperatury rekrytalizacji stali. Przeróbka w takich warunkach poprawia plastyczność i ciągliwość stali.

Niskotemperaturowa przeróbka plastyczna odbywa się poniżej temperatury rekrytalizacji i kontrolowanym chłodzeniu. Wskutek zdrowienia dynamicznego następuje podwyższenie właściwości wytrzymałościowych bez obniżenia właściwości plastycznych wyrobu.

Stale o podwyższonej wytrzymałości charakteryzują się strukturą martenzytyczną. Powstaje on z przemiany alotropowej austenitu wskutek poddaniu materiału hartowaniu i lub odpuszczaniu. Z reguły stale zostają podgrzane powyżej temperatury austenitowania i poddane przeróbce plastycznej na gorąco a następnie poddane schłodzeniu z założoną intensywnością w celu uzyskują żądanej struktury.

W trakcie hartowania martenzytycznego konieczne jest chłodzenie z temperatury powyżej krzywej AC_3 – temperatury austenitowania, z prędkością szybszą od krytycznej w celu uzyskania żądanej struktury. Na rysunku nr 9 przedstawione są schematyczne przebiegi hartowania objętościowego. Na wykresie a) przedstawiony jest przebieg zwykłego hartowania, na wykresach b) i c) zaprezentowane jest hartowanie martenzytyczne stopniowe a na grafice d) hartowanie bainityczne z przemianą izotermiczną. Jako efekt hartowania uzyskujemy materiał o strukturze martenzytycznej z austenitem szczątkowym oraz innymi składnikami które nie uległy przemianie strukturalnej w trakcie hartowania. W efekcie hartowania uzyskuje się bardzo wysoką twardość rzędu 60-65 HRC (ok. 627 HB – 711 HB). W zależności od oczekiwań dostosowuje się proces hartowania by w optymalnych warunkach przeprowadzić przemiany strukturalne.



Rysunek 9. Krzywe chłodzenia dla różnych rodzajów hartowania [16]

Martenzyt to przesycony roztwór węgla w żelazie α , powstały z austenitu (faza γ) przechłodzonego do temperatury uniemożliwiającej dyfuzję węgla. Charakteryzuje się wysoką twardością i kruchością. Temperatury rozpoczęcia i zakończenia przemiany fazowej uzależnione są od składu chemicznego i obniżają się wraz z wzrostem zawartości węgla i pierwiastków stopowych w składzie. Z wyjątkiem glinu Al i kobaltu Co które zwiększają temperaturę Ms.

2. Wymagania stawiane złączom spawanym

W tym rozdziale chciałbym przedstawić zarys informacji związanych z stalami o podwyższonej wytrzymałości. Złącza stalowe wykonane metodą spawania łukowego na poprawność technologiczną i możliwość wykorzystania w przemyśle bada się w oparciu o normę PN EN ISO 15614-1 [17]. Wytyczne i zgodność z tymi przepisami są szczególnie istotne dla wytwórców konstrukcji stalowych i urządzeń ciśnieniowych. W niej zawarte są wytyczne jakie badania należy przeprowadzić w celu sprawdzenia wykonanego złącza.

Wykonaną płytę próbną poddaje się kolejno badaniom powierzchniowych – badania wizualne, penetracyjne lub magnetyczno-proszkowe, w następnej kolejności wykonuje się badania objętościowe – radiograficzne lub ultradźwiękowe. W zależności od gatunku i gabarytów zastosowanych materiałów dobiera się właściwe metody badawcze. Materiały wysokostopowe kwasoodporne z reguły bada się powierzchniowo penetracyjnie i objętościowo radiograficznie. Przepisy dopuszczają stosowanie innych badań jednak wymaga to uzgodnień między stronami. Wszystkie stwierdzone niezgodności ocenia się w oparciu o wytyczne normy PN EN ISO 5817 [18]. Po wykonaniu badań nieniszczących z pozytywnym wynikiem należy przeprowadzić badania niszczące. Z każdego złącza wykonuje się 2 próby rozciągania poprzecznego spoiny, 4 próby gięcia, co najmniej 6 udarność, zgląd makrostruktury ukazujący spoinę, strefę wpływu ciepła i materiał rodzimy oraz wykonuje się pomiar twardości.

Rozciąganie przeprowadza się w oparciu o normę PN EN ISO 4136 [19]. Zgodnie z nią materiał na próbki należy pobrać z pełnej grubości badanego elementu. Jeśli nie ma takiej możliwości należy wykonać większą ilość próbek, zapewniając pobranie próbki z zakładką. Próbki do rozciągania mają przekrój prostokątny, odcinek równoległy musi obejmować spoinę i strefę wpływu ciepła SWC po obu stronach spoiny.

Gięcie przeprowadza się w oparciu o PN EN ISO 5173 [20]. Zależnie od grubości badanego elementu wykonuje się gięcie typu „lico-grań”, boczne lub wzdłużne. Próbkę należy zgiąć do kąta 180° na trzpieniu dobranym do materiału podstawowego.

Badanie udarność przeprowadza się na próbkach typu Charpy V w oparciu o przepisy PN EN ISO 148-1 [21]. Pobiera się 2 komplety próbek z spoiny oraz z strefy

wpływu ciepła. Oś próbek poprzecznie do osi spoiny, a karb prostopadle do powierzchni zewnętrznej według normy PN-EN ISO 9016 [22]. Jeśli grubość materiału nie pozwala na przygotowanie pełnowymiarowych próbek, dopuszcza się stosowanie próbek pod wymiarowych.

Badanie makroskopowe przeprowadza się na zglądzie metalograficznym przygotowanym zgodnie z PN-EN ISO 17639 [23]. Zgląd należy wytrawić w celu uwidocznienia spoiny, strefy wpływu ciepła, materiału rodzimego a także niezgodności występujących w złączy i SWC.

Badanie twardości wykonuje się metodą Vickersa według normy PN EN ISO 9015-1 [24]. Wykonuje się co najmniej jedną linię pomiarową zawierającą po 3 odciski w każdej strefie obu materiałów wykorzystanych do wytworzenia złącza. Jeśli grubość materiału i spoiny pozwala to wykonuje się 2 linie pomiarowe po jednej od lica i od grani.

Jeśli wyniki wszystkich przeprowadzonych prób są pozytywne można uznać daną technologię wytworzenia złącza za pozytywną. Po zatwierdzeniu wszystkich wyników przez niezależną stronę trzecią, technologia może być użyta w produkcji.

2.1. Charakterystyka stali konstrukcyjnych

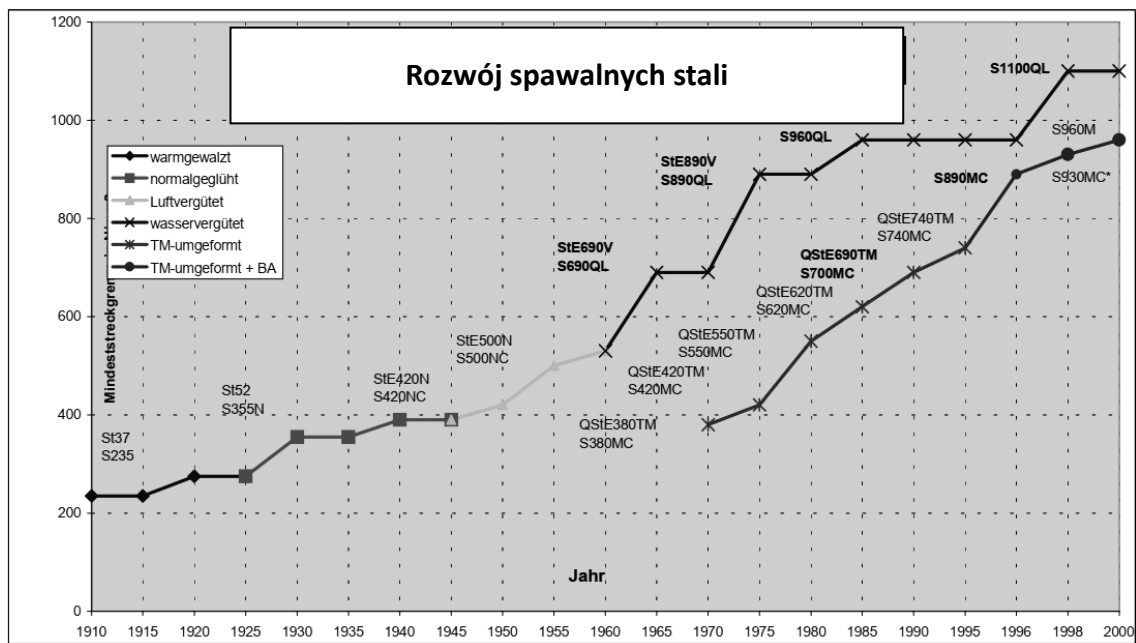
Rozwój przemysłu prowadził do stałego ulepszania procesów hutniczych a tym samym produkcji coraz lepszych materiałów konstrukcyjnych. Sam rozwój stali był ściśle związany z stale rosnącymi potrzebami i oczekiwaniami przemysłu. Graficznie przedstawiona chronologia opracowywanych stali widoczna jest na rys.5. Pierwszym gorąco walcowanym gatunkiem niestopowym była stal S235 opracowana ok. roku 1910. Do dziś jest jednym z najczęściej stosowanych gatunków na małe odpowiedzialne konstrukcje w budownictwie czy przemyśle maszynowym. Gatunek ten nadaje się do łączenia wszelkimi popularnymi metodami jak spawanie, połączenia skręcane czy nitowane [16].

Z biegiem lat ulepszano kolejne gatunki i powstawały stale o coraz wyższych parametrach wytrzymałościowych. Poprawianie parametrów wytrzymałościowych nie było tylko skutkiem ulepszania składu chemicznego poprzez zmniejszanie zawartości

zanieczyszczeń, ale również poprzez zmiany procesów wytwórczych [15], [16], [25]. Poddanie obróbce cieplnej, w szczególności normalizacji skutkowało poprawą struktury metalograficznej wyrobów a tym samym podniesienie granic wytrzymałości i plastyczności przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej ciągliwości materiałów.

Poprzez walcowanie na gorąco i następną normalizację otrzymano drobnoziarniste niskostopowe stale o maksymalnej granicy plastyczności na poziomie 460 MPa [26]. W wielu dziedzinach przemysłu są to nadal głównie stosowane gatunki do tworzenia konstrukcji i pojazdów.

Zwiększanie zawartości pierwiastków stopowych negatywnie wpływało na możliwości łączenia łukowego tych materiałów z uwagi na pogarszającą się spawalność [16]. Dzięki opracowaniu metody termomechanicznego walcowania możliwe było uzyskanie nowych gatunków stali o znacząco wyższych parametrach wytrzymałościowych przy zachowaniu dobrej spawalności i możliwości wytwórczych [3], [27]–[30].



Rysunek 10. Chronologia opracowania poszczególnych gatunków stali [3]

Stale drobnoziarniste miały swoje początki w latach 50-tych XX wieku [31]. Od tego momentu nastąpił dynamiczny rozwój metalurgii i opracowywane zostały nowe gatunki o coraz wyższych parametrach wytrzymałościowych – rysunek 10. Na dzień dzisiejszy wyroby walcowane drobnoziarniste z stali niestopowych ujęte zostały w grupę norm PN EN 10025 [26], [32]–[36]. Są to typowe stale niskostopowe o zawartości

pierwiastków stopowych na maksymalnym poziomie przedstawionym w tabelach nr 1, 2 i 3. Stale z tych grup charakteryzują się maksymalną wartością równoważnika węgla CEV na poziomie $CEV \leq 0,49$ dla materiałów według PN EN 10025-2 [34] oraz $CEV \leq 0,55$ dla materiałów według PN EN 10025-3. Z kolei dla stali o podwyższonych wytrzymałościach współczynnik CEV wynosi aż 0,82 dla gatunku S960 [36]. Dobrzański [16] opisuje spawalność jako technologiczną zdolność materiału do uzyskiwania założonych właściwości mechanicznych po spawaniu.

Tabela 1. Skład chemiczny stali drobnoziarnistych według PN EN 10025-2 [34]

Oznaczenie		Metoda odtlenienia	C w max % dla wyrobu o grubości nominalnej w mm			Si % max	Mn % max	P % max	S % max	N % max	Cu % max
Według EN 10027-1 I CR 10260	Według EN 10027-2		≤ 16	$> 16 \leq 40$	> 40						
S235JR	1.0038	FN	0,19	0,19	0,23	-	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60
S235J0	1.0114	FN	0,19	0,19	0,19	-	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60
S235J2	1.0117	FF	0,19	0,19	0,19	-	1,50	0,035	0,035	-	0,60
S275JR	1.0044	FN	0,24	0,24	0,25	-	1,60	0,045	0,045	0,014	0,60
S275J0	1.0143	FN	0,21	0,21	0,21	-	1,60	0,045	0,045	0,014	0,60
S275J2	1.0145	FF	0,21	0,21	0,21	-	1,60	0,035	0,035	-	0,60
S355JR	1.0045	FN	0,27	0,27	0,27	0,60	1,70	0,045	0,045	0,014	0,60
S355J0	1.0553	FN	0,23	0,23	0,23	0,60	1,70	0,035	0,035	0,014	0,60
S355J2	1.0577	FF	0,23	0,23	0,23	0,60	1,70	0,035	0,035	-	0,60
S355K2	1.0596	FF	0,23	0,23	0,23	0,60	1,70	0,035	0,035	-	0,60

Tabela 2. Skład chemiczny stali drobnoziarnistych według PN EN 10025-3 [26]

Oznaczenie		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb %	V %	Al %	Ti %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	N %
wg EN 10027-1 CR 10260	wg EN 10027-2														
		max	max	max	max 10^{-3}	max 10^{-3}	max 10^{-3}	max 10^{-3}	min 10^{-3}	max 10^{-3}	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max 10^{-3}
S275N	1.0490	0,20	0,45	0,45	35	30	6	7	15	6	35	35	13	6	17
S275NL	1.0491	0,18		1,60	30	25									
S355N	1.0545	0,22	0,55	0,85	35	30	6	14	15	6	35	55	13	6	17
S355NL	1.0546	0,20		1,75	30	25									
S420N	1.8902	0,22	0,65	0,95	35	30	6	22	15	6	35	85	13	6	27
S420NL	1.8912			1,80	30	25									
S460N	1.8901	0,22	0,65	0,95	35	30	6	22	15	6	35	85	13	6	27
S460NL	1.8903			1,80	30	25									

Tabela 3. Skład chemiczny stali drobnoziarnistych według PN EN 10025-6 [36]

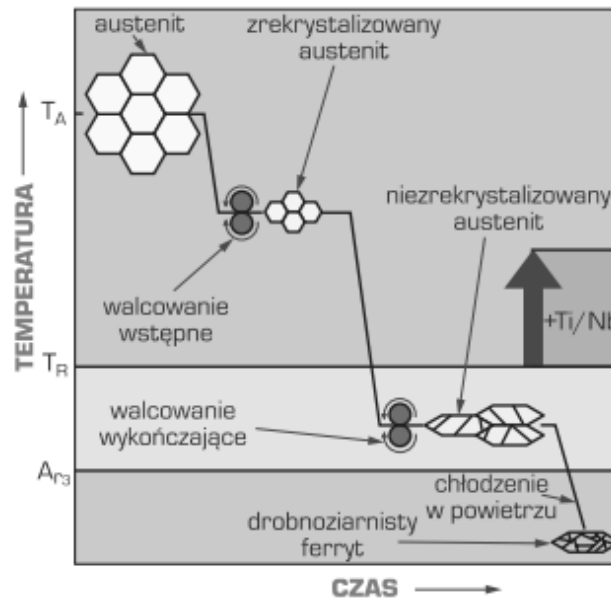
Gatunek	Jakość	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	B %	Cr %	Cu %	Mo %	Nb %	Ni %	Ti %	V %	Zr %
		max 10^{-2}	max 10^{-2}	max	max 10^{-3}	max 10^{-3}	max 10^{-3}	max 10^{-3}	max	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max	max 10^{-2}	max 10^{-2}	max 10^{-2}
Wszystkie gatunki	Bez symbolu	22	86	1,80	300	17	16	6	1,6	55	74	7	2,1	7	14	17
	L				25	12										
	L1				20	12										

Wskutek normalizacji możliwe jest uzyskanie stali o minimalnej granicy plastyczności rzędu 460 MPa. Typowymi przedstawicielami stali normalizowanych są S355N oraz S460N. W celu uzyskania wyższych granic plastyczności dla stali normalizowanych konieczne jest zwiększenie zawartości pierwiastków stopowych, które z kolei będzie negatywnie wpływało na spawalność stali [16], [37]. Wraz z zmianą równoważnika węgla zmienia się spawalność stali [37], [38]. Generalnie dąży się do minimalizacji tego parametru. Jednak stosując nowoczesne materiały konstrukcyjne samo bazowanie na poziomie równoważnika węgla jest niewystarczające.

Zwiększenie wytrzymałości materiałów stalowych może być uzyskane poprzez zwiększenie zawartości węgla i manganu. Poprzez dodanie aluminium oraz krzemu stworzona została pierwsza stal o wyższej wytrzymałości i dobrej spawalności – St52-3 lub według aktualnej nomenklatury S355 [3]. Dodatek aluminium łączy rozpuszczony azot przez co przyczynia się do zwiększonej odporności starzeniowej. Jednocześnie powstające azotki utrudniają proces rozrostu ziaren, co skutkuje bardziej drobnoziarnistą strukturą krystalograficzną.

Kolejnym sposobem zwiększenia granicy plastyczności jest zmiana procesu produkcyjnego. Proces termomechanicznego walcowania stali drobnoziarnistych gwarantuje uzyskanie stali o granicach plastyczności w zakresie 355 MPa do 690 MPa. Jako termomechaniczne walcowanie – przedstawione schematycznie na rysunku 11, uznaje się proces walcowniczy z zdefiniowanym stopniem odkształcenia w określonym zakresie temperaturowym, które niemożliwe jest do osiągnięcia poprzez jedynie poprzez proces obróbki cieplnej [16].

Stal w trakcie walcowania termomechanicznego zostaje wstępnie poddana walcowaniu w wyższej niż temperatura rekrytalizacji jednak poniżej temperatury austenitizacji. W trakcie walcowania zachodzi rekrytalizacja dynamiczna a w przerwach między kolejnymi przejściami przez walce, rekrytalizacja metadynamiczna austenitu. Po obniżeniu temperatury poniżej temperatury rekrytalizacji zachodzi zdrowienie dynamiczne i statyczne austenitu. Wskutek dalszego chłodzenia następuje przemiana wydłużonych i spłaszczonych ziaren austenitu w drobnoziarnisty ferryt.



Rysunek 11. Schemat walcowania termomechanicznego [16]

2.2. Metody łukowego łączenia stali

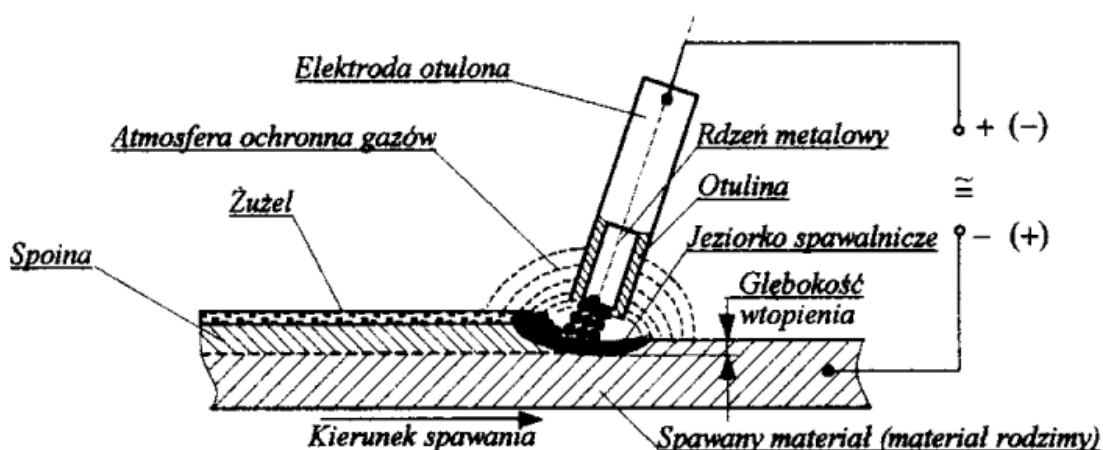
Spawanie jest obecnie jedną z najpopularniejszych metod trwałego łączenia stali, stopów żelaznych jak również tworzyw sztucznych. Istotnym punktem zwrotnym był moment zastąpienia elektrody grafitowej na metalową pod koniec XIX wieku [39]. Pełniła ona jednocześnie funkcję przewodnika dla łuku elektrycznego oraz materiału dodatkowego do spawania. W 1908 roku został zgłoszony patent na elektrody otulone [40]. Metoda spawania elektrodą otuloną również obecnie jest jedną z najpopularniejszych metod spawalniczych. Z biegiem lat zostały opracowane kolejne metody zyskujące coraz większą popularność w produkcji konstrukcji stalowych. Każda z nowych metod była odpowiedzią na potrzeby przemysłu. Najpopularniejsze metody w tej chwili w klasyfikacji według normy PN-EN ISO 4063 to:

- 111 ręczne spawanie łukowe elektrodą otuloną,
- 135 spawanie łukowe drutem elektrodowym litym w osłonie gazu aktywnego,
- 141 spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego z dodatkiem drutu/pręta litego.

Wymienione wyżej to tylko kilka z szeregu uznanych i rozpowszechnionych metod łukowego łączenia metali. Jednak bezsprzecznie te wymienione są najczęściej występujące.

2.2.1. Ręczne spawanie łukowe elektrodą otuloną.

Metoda spawania ręcznego elektrodą otuloną zalicza się do spawania łukowego. Norma PN EN ISO 4063 opisuje procesy spawalnicze tej grupy jako spawanie łukowe metali elektrodą zużywalną. Kodowe oznaczenie tej metody to 111. Spawanie elektrodą charakteryzuje się powstawaniem łuku elektrycznego pomiędzy elektrodą a jeziorkiem spawalniczym. Osłona gazowa jest zapewniana przez atmosferę ochronną powstałą z otuliny. Tworzy ona żużel oraz gazy chroniące kroplę ciekłego metalu oraz jeziorko przed dostępem powietrza a tym samym tlenu, azotu czy wodoru. Elektroda wykorzystana do spawania jest jednocześnie jednym z biegunów, drugim jest łączony materiał/jeziorko spawalnicze. Do spawania można wykorzystać źródło prądu stałego bądź przemiennego. Rodzaj bieguna przyłożonego do elektrody jest uzależniony od gatunku otuliny. Wskutek przepływu prądu powstający łuk topi metaliczny rdzeń i umożliwia wypełnienie rowka spawalniczego.



Rysunek 12. Schemat przebiegu procesu spawania łukowego elektrodą otuloną [41]

W zależności od rodzaju spoiny oraz materiału podstawowego konieczny jest inny prąd do stopienia elektrody. Ten z kolei ogranicza średnice i długości elektrod. Dlatego dostępnych wiele gatunków o różnych średnicach i długościach. Wraz z wzrostem średnicy elektrody możliwy jest przepływ większego prądu. Ich podział jest szczegółowo opisany w normie PN EN ISO 2560 [42] (która zastąpiła [43]). W oznaczeniu kodowym zawarte są szczegółowe informacje odnośnie do składu i przeznaczenia konkretnego wyrobu. Oznaczenie zawiera 8 grup informacyjnych.

Tabela 4. Oznaczenie kodowe elektrody otulonej według [42]

PN-EN	E	46	3	1Ni	B	5	4	H5
	1	2	3	4	5	6	7	8

1 – E – Wyrób lub metoda spawania

2 – 46 – Symbol wytrzymałości i wydłużenie spoiwa,

3 – 3 – Temperatura pracy łamania dla pracy łamania nie mniejszej niż 47J

4 – 1Ni – symbol oznaczenia chemicznego stopiwa

5 – B – Symbol rodzaju otuliny

6 – 5 – Symbol uzysku stopiwa i rodzaju prądu spawania







7 – 4 – Sugerowane pozycje spawania

8 – H5 – Symbol zawartości wodoru w stopiwie

Skład i grubość otuliny mają bezpośredni wpływ na parametry spawania. Ma wpływ na stabilność łuku, sposób przejścia materiału z elektrody do spoiny oraz na lepkość żużlu i jeziorka.

Otulina elektrod kwasowych – oznaczenie A – w znacznej mierze składa się z rud żelaza i manganu, wskutek czego atmosfera wokół łuku zawiera większą ilość tlenu. Tlen zostaje absorbowany przez spoiwo i obniża napięcie powierzchniowe ciekłej spoiny. W efekcie materiał jest przenoszony w formie bardzo drobnych kropli przypominających mżawkę a zarazem jeziorko spawalnicze jest bardzo płynne. Nie nadają się do spawania w pozycjach wymuszonych. Absorbowany tlen zwiększa temperaturę łuku, umożliwia to zwiększenie prędkości spawania jednak może powodować podtopienia materiałów bazowych.

Otulina celulozowa – oznaczenie C – składa się w znacznej mierze z materiałów organicznych które się spalają w trakcie spawania tworząc atmosferę ochronną. Z uwagi na małą zawartość składników stopowych i stabilizujących łuk powstają małe ilości żużli. Przenoszenie materiału następuje kroplami średnimi do dużych. Używanie tych elektrod pozycji opadowej PG – rysunek 13.

symbol	typ złącza	AWS ASME	PN-EN	nazwa pozycji
	doczołowe kątowe	1G 1F	PA PA	podolna podolna
	doczołowe	2G	PC	naścienna
	doczołowe kątowe	4G -	PE PD	pułapowa okapowa
	doczołowe kątowe	3G -	PF PF	pionowa z dołu do góry pionowa z dołu do góry
	doczołowe kątowe	3G -	PG PG	pionowa z góry na dół pionowa z góry na dół
	kątowe	2F	PB	naboczna

Rysunek 13. Pozycje spawania [44]

Elektrody o otulinie zasadowej – oznaczenie B – zawierają w otulinie tlenki wapna CaO lub magnezu MgO oraz fluoryt CaF₂ mający na celu rozrzedzenie szlaki. Większe poziomy zawartości fluorytu uniemożliwiają spawanie tych elektrod prądem zmiennym. Jeziorko spawalnicze jest gęste a materiał spawalniczy jest przenoszony kroplami średnimi bądź dużymi. Elektrody zasadowe są higroskopijne i należy zwrócić szczególną uwagę właściwe suszenie przed użyciem. Spoiny wykonane tymi elektrodami cechują się niską zawartością wodoru.

Elektrody rutowe – oznaczenie R – zawierają tlenek tytanu w osłonie w formie rutyłu TiO₂ bądź ilmenitu TiO₂ FeO. Powstały żużel jest łatwy do usunięcia co występuje w elektrodach z dużą zawartością rutyłu. Przenoszenie materiału następuje kroplami drobnymi do średniej wielkości z małą ilością odprysków. Cechą szczególną elektrod rutowych jest możliwość kontynuacji spawania bez uprzedniego usunięcia żużlu. Dzieje się tak z uwagi na dużą zawartość rutyłu i jego zachowanie podobne do półprzewodników. Tego typu otuliny są często bazą dla otulin mieszanych rutylo-celulozowych, rutylo-zasadowych czy rutylo-kwasowych.

Grubootulone elektrody rutowe (oznaczone R lub RR) cechuje dobre ponowne zajarzanie, łatwe usuwanie żużlu oraz estetyczny wygląd spoiny. Elektrody rutylo-celulozowe RC umożliwiają spawanie w prawie wszystkich pozycjach są elektrodami o bardzo uniwersalnym zastosowaniu. Elektrody rutylo-zasadowe RB z uwagi na z reguły dość cienką warstwę otuliny nadają się szczególnie do ściegów przetopowych i

spawania w pozycji pionowej PF oraz do spawania rur o mniejszych do średnich grubości ścianek.

Kolejnym istotnym składnikiem otulin są pierwiastki stopowe zwiększające uzysk spoiwa w stosunku do rdzenia metalicznego elektrody. Możliwy uzysk wynosi w większości przypadków między 105% a 160%. Wraz z zwiększaniem stopnia uzysku stopiwa ograniczeniu ulegają możliwości spawania w pozycjach wymuszonych. Dla najbardziej wydajnych elektrodo możliwe staje się wyłącznie spawanie w pozycjach podstawowych PA i PB.

Spoina z zasady powinna spełniać wymagania stawiane materiałowi podstawowemu. Stąd istotne jest dobrać właściwą elektrodę do materiału podstawowego, szczególnie pod względem granicy plastyczności, wytrzymałości oraz wydłużenia. Umiejętnie dobierając materiał spawalniczy można sterować prawdopodobną granicą kruchości przy zadanej temperaturze badania. Odczytując oznaczenie z Tabeli 1 uzyskujemy następujące informacje. Są to elektrody przeznaczone do ręcznego spawania o granicy plastyczności $R_e \geq 460$ MPa i wytrzymałości rzędu R_m pomiędzy 530 a 680 MPa oraz wydłużeniu wyższym niż $A_5 \geq 20\%$. Praca łamania nie mniejsza niż 47J w temperaturze -30°C . Skład chemiczny stopiwa to $\text{Mn} \leq 1,4\%$, $0,6 \leq \text{Ni} \leq 1,2\%$ oraz pozostałych pierwiastków stopowych $\text{Mo} < 0,2$; $\text{Cr} < 0,2$; $\text{V} < 0,05$; $\text{Nb} < 0,05$; $\text{Cu} < 0,3$. Są to elektrody w otulinie zasadowej o uzysku między 125 a 160% nadające się do spawania prądem stałym i zmiennym w pozycji PA. Potencjalna zawartość wodoru w spoinie będzie wynosić poniżej 5ml/100g.

Zaletami metody 111 jest duża uniwersalność w stosunku do materiałów podstawowych. Można nią spawać stale niestopowe i stopowe, staliwa, żeliwa, stopy niklu, stopy metali nieżelaznych. Jest popularną metodą spawania w warunkach „polowych” z uwagi na prostotę oraz zapotrzebowanie jedynie źródła energii elektrycznej oraz niskiej masy i prostoty źródła spawalniczego. Umożliwiają łączenie szerokiego spektrum grubości elementów.

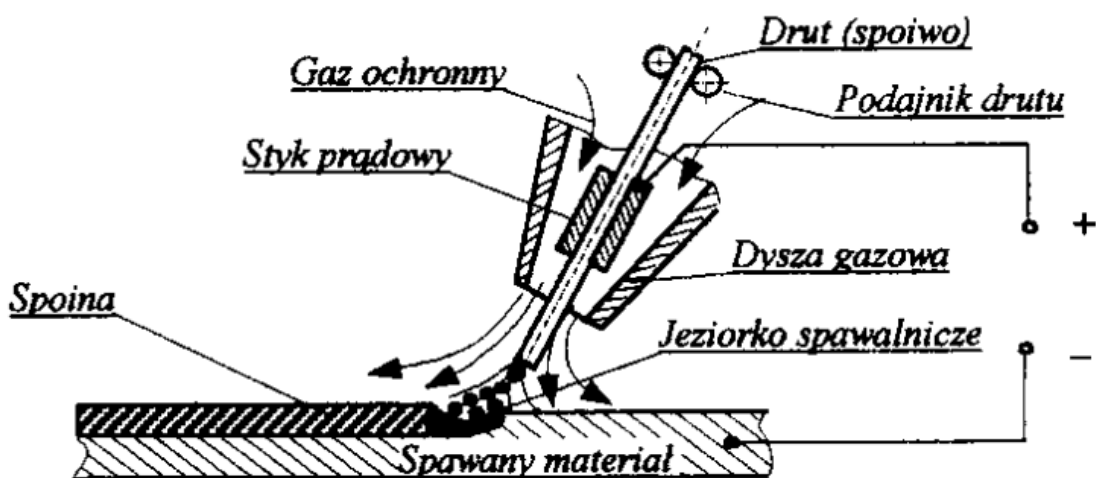
Wadami spawania elektrodami otulonymi niska wydajność i mała prędkość spawania bezpośrednio uzależniona od użytej elektrody (jej średnicy i długości) oraz parametrów spawania. Konieczność oczyszczania spoin oraz pozostałości po elektro-

dach. W trakcie spawania otulina tworząc atmosferę ochronną wydziela duże ilości dymu i gazów a także zabezpieczenia przed wilgocią.

2.2.2. Spawanie łukowe drutem elektrodowym litym w osłonie gazu aktywnego.

Metoda łukowego spawania drutem elektrodowym w osłonie gazu została opracowana pod koniec lat 40 w Stanach Zjednoczonych. Początkowo wykorzystywany do zapewnienia atmosfery ochronnej był gaz obojętny argon Ar czy hel He zawierające małe ilości zanieczyszczeń (np. tlen). W latach 50-tych Rosjanie zaczęli używać dwutlenku węgla CO₂ będącego tańszym od gazów obojętnych. Było to możliwe dzięki opracowaniu nowych gatunków drutów elektrodowych uwzględniających wypalanie pierwiastków stopowych w trakcie spawania – rysunek 14.

Jest to aktualnie najpopularniejsza metoda wykorzystywana zarówno w zakładach rzemieślniczych jak i dużych zakładach przemysłowych.



Rysunek 14. Schematyczny proces spawania elektrodą topliwą [41]

Definicja tej metody spawalniczej brzmi: spawanie łukowe metali z wykorzystaniem topliwej elektrody przy czym łuk elektryczny oraz jezioro spawalnicze są chronione atmosferą gazową pochodzącą z innego źródła. Zależnie od rodzaju gazu będą miały inne oznaczenie. Stosując gazy obojętne będzie to tzw. MIG o oznaczeniu kodowym 131 bądź MAG z oznaczeniem kodowym 135 stosując gazy aktywne.

Drut spawalniczy nawinięty na szpule jest podawany przez podajnik do palnika, w którym poprzez końcówkę prądową jest zasilony prądem w celu zajarzenia łuku elektrycznego pomiędzy drutem a materiałem podstawowym. Równocześnie wraz podawaniem drutu z dyszy gazowej jest zapewniona atmosfera ochronna łuku oraz jeziora spawalniczego. Zależnie od składu mieszanki użytej do stworzenia atmosfery ochronnej będzie wpływała bezpośrednio na łuk elektryczny zmieniając jego przewodność elektryczną oraz właściwości spawalnicze. Atmosfera ochronna wpływa też bezpośrednio na sposób topienia i spalania drutu elektrodowego a tym samym wpływa bezpośrednio na skład metalurgiczny spoiwy.

Spawanie metodami MIG/MAG odbywa się z zasady prądem stałym jednak współczesne źródła spawalnicze umożliwiają spawanie niektórych materiałów prądem zmiennym przykładowo spawanie aluminium.

Podobnie jak dla elektrod otulonych również materiały spawalnicze drutem elektrodowym są scharakteryzowane w normie [45] i posiadają swoje oznaczenia kodowe. Drut elektrodowy jest klasyfikowany według składu chemicznego a oznaczenia stopiwa uzyskanego po zastosowaniu właściwego gazu osłonowego zawiera dodatkowe dane wytrzymałościowe.

Tabela 5. Oznaczenie kodowe elektrody drutowej i stopiwa według [45]

PN-EN	G	46	3	M	G3Si1
	1	2	3	4	5

1 – G – – Wyrób lub metoda spawania

2 – 46 – Symbol wytrzymałości i wydłużenie spoiwa,

3 – 3 – Temperatura pracy łamania dla pracy łamania nie mniejszej niż 47J

4 – M – symbol gazu osłonowego

5 – G3Si1 – symbol składu chemicznego drutu elektrodowego

Gazy osłonowe aktywne do spawania metodą MAG dzieli się pod względem ich właściwości utleniających [46]. Rozróżnia się od mieszanek słabo utleniających zawierające do 5% CO₂ do zawierających 100% dwutlenku węgla i mieszanki zawierające do 30% tlenu a reszta dwutlenek węgla. Ta ostatnia grupa jest silniej utleniająca w trakcie

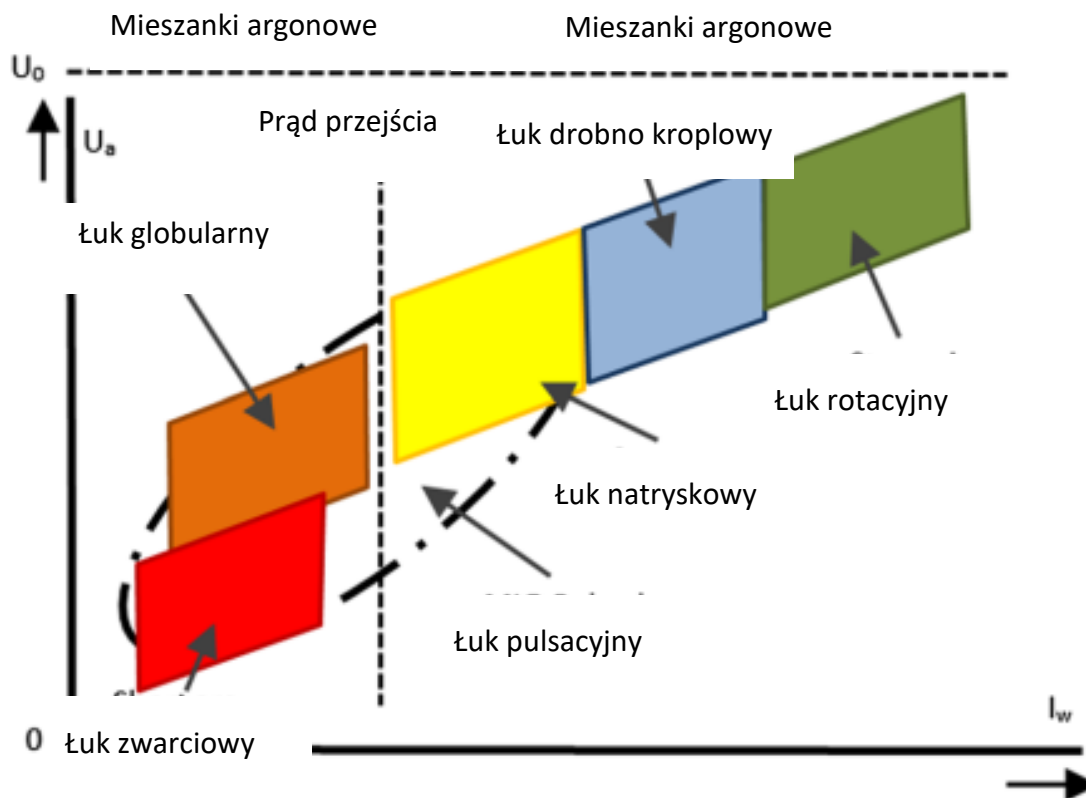
spawania. Spowodowane jest to rozpadem dwutlenku węgla w wysokiej temperaturze łuku spawalniczego i wydzielony zostaje tlenek węgla oraz tlen.

Zależnie od przeznaczenia i grubości łączonych materiałów są dostępne druty elektrodowe o różnych średnicach, standardowo pomiędzy $\varnothing 0,6$ a $\varnothing 4,0$ mm. Dla spawania metodami MIG/MAG są to miedziowane druty o średnicach 0,8; 1,0; 1,2; lub 1,6 mm. Powlekanie powierzchni obniża poziom tarcia a także poprawia przewodność elektryczną. Dotyczy to jedynie drutów litych dla materiałów niestopowych. Wszystkie stopowe gatunki drutów elektrodowych oraz aluminium nie mają możliwości galwanicznego powlekania miedzią.

Dobierając materiały spawalnicze i mieszanki gazowe do spawania ma się na uwadze chęć uzyskania w stopiwie podobnych właściwości wytrzymałościowych co materiał rodzimy. Materiał spawalniczy opisany jako G 46 3 M G3Si1 jest przeznaczony do spawania łukowego w osłonie mieszanką CO₂ stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych niestopowych. Właściwości wytrzymałościowe stopiwa będą wynosiły $R_e \geq 460$ MPa, $R_m = 530$ a 680 MPa oraz wydłużenie $A_5 \geq 20$ %. Praca łamania 47J przy temperaturze $t = -30^\circ\text{C}$.

Przenoszenie materiału pomiędzy drutem elektrodowym a jeziorkiem spawalniczym – rysunek 15, może następować na jeden z 4 sposobów [41]:

Zwarcio – metoda ta charakteryzuje się bardzo krótkim łukiem, wskutek ciepła wytworzonego łukiem elektrycznym na końcu drutu elektrodowego powstaje drobna kropla ciekłego metalu która w kontakcie z jeziorkiem spawalniczym powoduje zwarcie co wygasza łuk elektryczny. Kropla ciekłego metalu zostaje wchłonięta do spoiny. Następnie ponownie zajarza się łuk elektryczny [47]. Współczesne źródła spawalnicze wyposażone są w układy zabezpieczające przed wysokimi impulsami prądowymi w momencie zwarcia. Ta metoda przenoszenia materiały występuje przy niskich parametrach spawania – niskich napięciach i prądach,



Rysunek 15. Rodzaje przenoszenia materiału w spawaniu łukowym [47]

Kroplowo – występuje przy wysokich parametrach spawania wtedy ciekły metal przechodzi dużymi kroplami pod wpływem grawitacji do jeziora spawalniczego. Często występują długotrwałe zwarcia wskutek a tym samym w wysokie prądy zwarciový. Prowadzi to do częstych rozprysków przy ponownym zajarzaniu łuku. Wprowadza się dużo ciepła co prowadzi do rozrostu jeziora i jego znacznej płynności. Proces ten nadaje się wyłącznie do podstawowych pozycji spawania PA i PB,

Natryskowo – występuje przy wyższych parametrach spawania, szczególnie w przypadku stosowania mieszanek z wysoką zawartością argonu. Dochodzi do efektu szczypania stopionego materiału (Pinch effect) [47] i bez zwarciový materiał zostaje przeniesiony do jeziora spawalniczego. Przy tej metodzie przenoszenia jezioro jest dużych rozmiarów i ma wysoką temperaturę. [48]

Prądem stałym impulsowym – powstaje w momencie przepływu prądu impulsowo. Wpływ na rodzaj przenoszenia mają parametry spawania prądu, napięcia czy posuwu drutu elektrodowego. Również amplituda okres i częstotliwość impulsów są

istotne. Dochodzi wtedy do tworzenia drobnych, pojedynczych kropli bez rozprysków przenoszonych do jeziora spawalniczego.

Zaletami stosowania metod spawania MIG/MAG są jej uniwersalność umożliwiająca spawania różnych materiałów niemal w wszystkich pozycjach. W porównaniu do spawania elektrodami otulonymi znacząco wyższa jest wydajność spawania przy wielokrotnie niższych kosztach wytworzenia złączy. Brak konieczności usunięcia żużlu z gotowych złączy jak i w trakcie spawania. Dobrej jakości spoiny. Istnieje możliwość zautomatyzowania i zrobotyzowania procesu spawania.

Jakość spoin wprost zależna od umiejętności i doświadczenia personelu wykonującego złącza. Z uwagi na większe skomplikowanie źródła spawalniczego są one znacząco droższe. Charakterystyka metody skłania do powstania w złączy przyklejenia między ścięgowego bądź wprowadzenia por.

2.3. Przepisy i normy przedmiotowe dla połączeń spawanych

W zależności od rynku na jaki jest przeznaczona konstrukcja możliwe jest zbadanie spoin w oparciu o różne przepisy. Jednak w zdecydowanej większości na rynku europejskim będzie to norma PN EN ISO 15614 [17]. Drugimi bardzo popularnymi przepisami są ASME Sekcja IX [49] wymaganymi głównie na rynki amerykańskie.

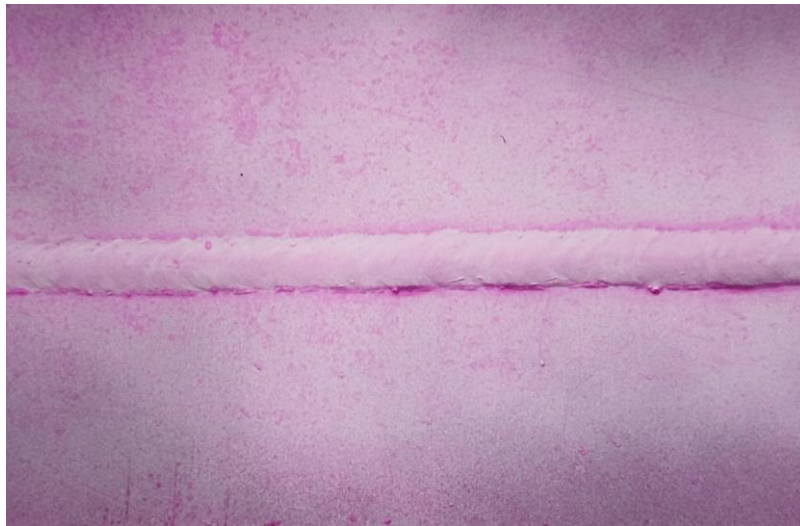
Dla potwierdzenia umiejętności wykonania poprawnego złącza należy przeprowadzić badania a następnie zatwierdzić technologię spawania w oparciu o PN EN ISO 15614 w której wyspecyfikowane są warunki konieczne do kwalifikowania technologii spawania. W zależności od gatunku materiału podstawowego i rodzaju złącza które chcemy wykonać należy wybrać właściwą część. Norma ta ma 14 części, każda odnosząca się do innej metody spawania/łączenia, rodzaju złącz lub materiałów. Pierwsza część odnosi się spawania łukowego i gazowego stali oraz do łukowego spawania niklu i jego stopów.

Postępując zgodnie z wytycznymi normy należy przed przystąpieniem do kwalifikacji przygotować wstępną instrukcję spawania – pWPS. W dokumencie tym zawarte będą wszystkie informacje odnośnie do przygotowywanego złącza. Chcąc spawać blachy należy przygotować 2 arkusze o żądanej grubości i minimalnych wymiarach 150 x

350 mm. Mając wykonane złącze można przystąpić do badań nieniszczących oraz niszczących. Zgodnie z tablicą 2 należy przeprowadzić szereg badań:

Badania wizualne – wykonuje się oględziny okiem nieuzbrojonym spoiny i materiału podstawowego w celu wykrycia niezgodności spawalniczych. Zarejestrowane niezgodności poddaje się ocenie według tablicy 4 normy [17] a także w odniesieniu poziomów jakości zamieszczonych w PN EN ISO 5817 [18].

Wykrycie pęknięć powierzchniowych – nie jest narzucone jaką metodą badawczą należy to wykonać. Możliwe jest wykonanie badań penetracyjnych bądź magnetyczno-proszkowych – rys. 16.

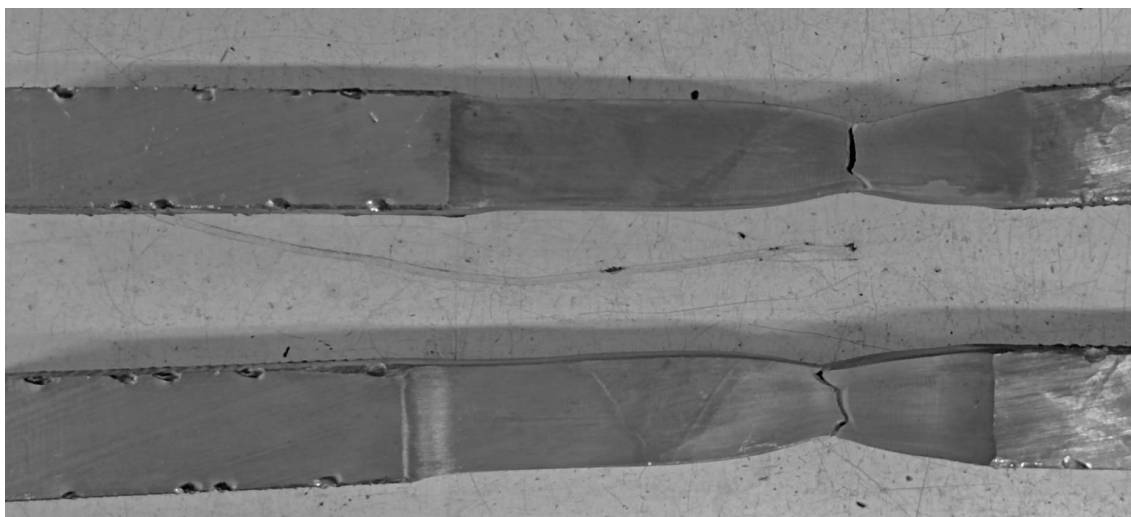


Rysunek 16. Złącze spawane poddane badaniu penetracyjnemu.

Badanie objętościowe spoiny – dla stali niskostopowych o grubości powyżej 8 mm możliwe jest wykonanie badań ultradźwiękowych. W pozostałych przypadkach (stale stopowe, stale niskostopowe o grubościach $t < 8$ mm) należy wykonać badania radiograficzne.

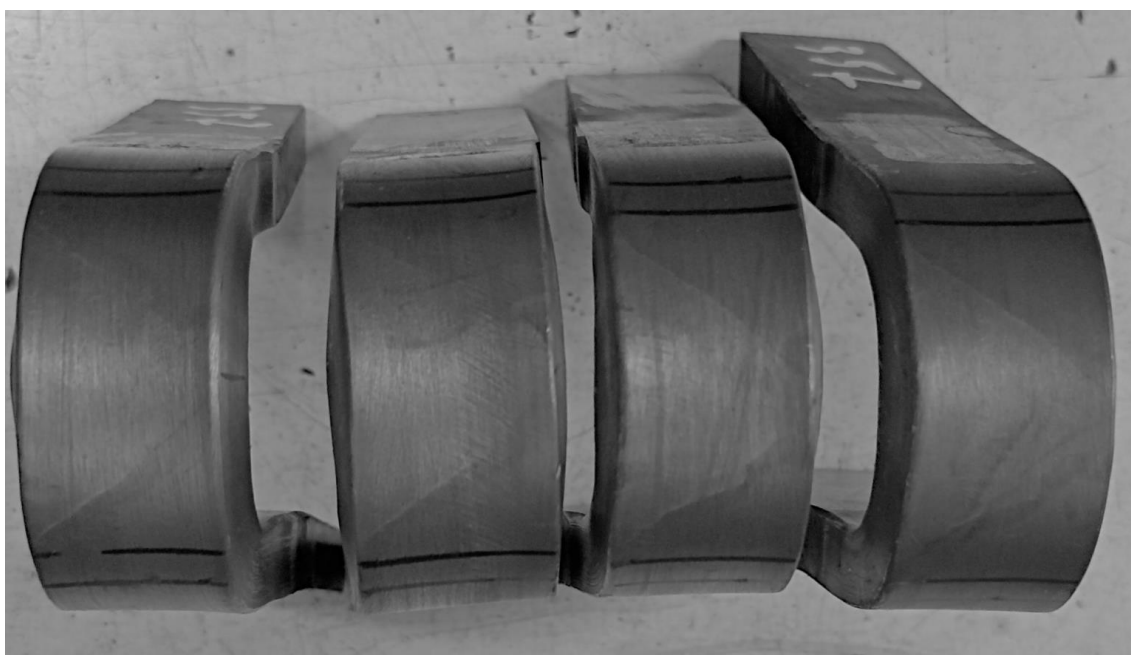
Jeśli wykonane badania nieniszczące zostaną uznane za pozytywne można przystąpić do badań niszczących wytrzymałościowych. Norma PN EN ISO 15614-1 [17] narzuca nam konieczność wykonania szeregu badań:

Rozciąganie – 2 rozciągania poprzeczne – próbki pobrane poprzecznie do spoiny z pełnej grubości materiału lub jeśli wystąpi taka konieczność to suma grubości próbek musi odpowiadać co najmniej grubości wyjściowej złącza. Badanie opisane w normie PN EN ISO 4136 [19] – rys 17.

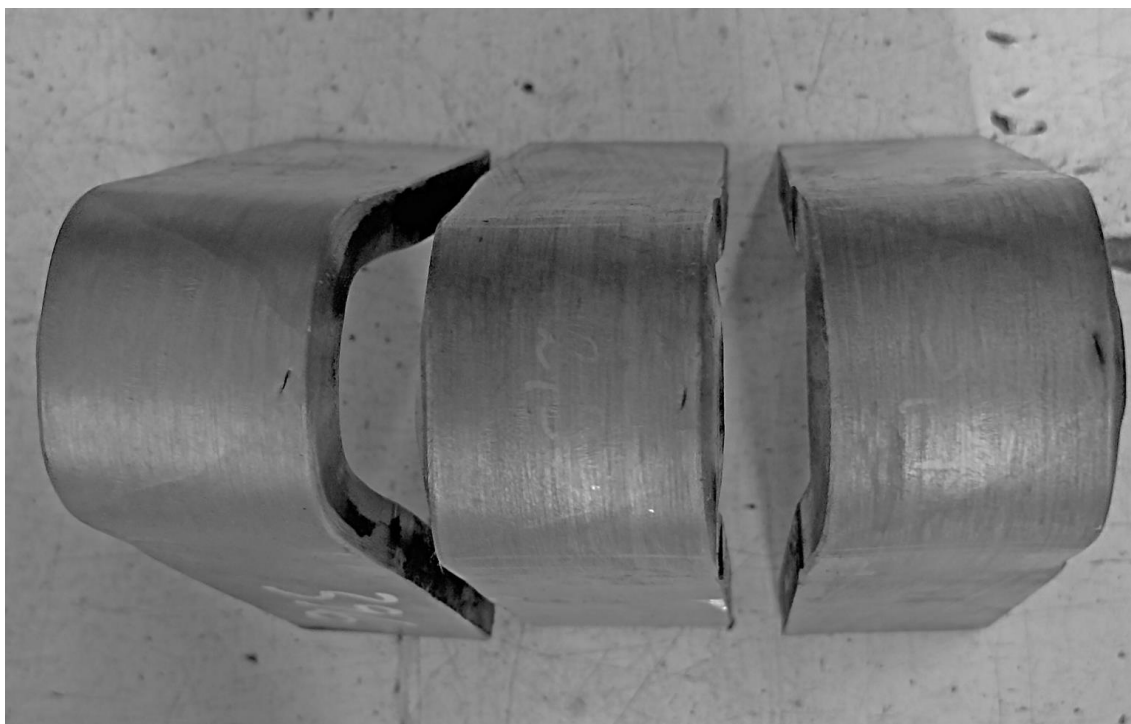


Rysunek 17. Próbki po rozciąganiu - widok boczny spoiny

Gięcie – 4 gięcia poprzeczne spoiny - w zależności od grubości złącza możliwe jest wykonanie gięcia typu „lico-grań” lub boczne według normy PN EN ISO 5173 [20]. Maksymalna grubość złącza do wykonania tego badania wynosi 30 mm. Próbki należy mechanicznie obrobić do maksymalnej grubości 10 mm. Dla złącza o grubości równej lub większej od 10 mm możliwe jest wykonanie gięcia bocznego – rys. 18 i 19.



Rysunek 18. Próbki po gięciu bocznym



Rysunek 19. Próbki po gięciu bocznym - z otwarciem

Udarność – 2 komplety udarowości – Dla złączy doczołowych należy wykonać komplet próbek poprzecznie do złącza z spoiny oraz strefy wpływu ciepła według normy PN EN ISO 9016 [22]. Dla złączy o grubości materiału podstawowego $t > 50$ mm obligatoryjny jest taki sam komplet pobrany z grani. Jeśli w jednym złączy były użyte więcej niż jedna metoda spawalnicza to z każdej metody należy wykonać badania.

Twardość – w oparciu o normę PN EN ISO 9015-1 [24] należy przeprowadzić pomiar twardości metodą Vickers'a na jednej próbce. Graniczne wartości zależnie od grupy materiałowej materiału podstawowego oraz stanu obróbki cieplnej zawarto w tabeli 3 [17]. Dla złączy o grubości powyżej 5 mm należy wykonać 2 linie pomiarowe, poniżej wystarczy jedna. Wykorzystując kilka metod spawalniczych należy na każdej sprawdzić twardość.

Makro – należy wykonać jedno makro z złącza doczołowego i przygotować trawiony zgład do oceny. Widoczne muszą być spoina, strefa wpływu ciepła, poszczególne ściegi oraz materiał podstawowy.

Ocenę wyników należy przeprowadza się w odniesieniu do wymogów stawianych materiałom podstawowym, jeśli nie zostały wprost określony w normie na uznanie technologii. Wynik rozciągania poprzecznego spoiny musi się zawierać w widełkach

określonych dla słabszego z łączonych materiałów. Odstępstwem może być sytuacja, w której z premedytacją użyto materiałów niespełniających wymagań materiału jednak zostało to uzgodnione i zaakceptowane przez wytwórcę i odbiorcę.

Próbki poddane gięciu są akceptowalne, jeśli uwidocznione niezgodności nie przekraczają 3 mm w dowolnym kierunku. Pomija się w ocenie niezgodności których początek zaczyna się na krawędzi próbki.

Udarność wykonana w zadanej temperaturze jest pozytywna, jeśli wszystkie próbki spełniły założone kryterium i ich średnia jest wyższa od minimalnej. Dopuszczalna jest sytuacja, w której jedna z próbek ma wynik na poziomie 70% minimalnej wartości jednak średnia jest powyżej minimum.

2.4. Wymagania dotyczące identyfikacji właściwości zmęczeniowych

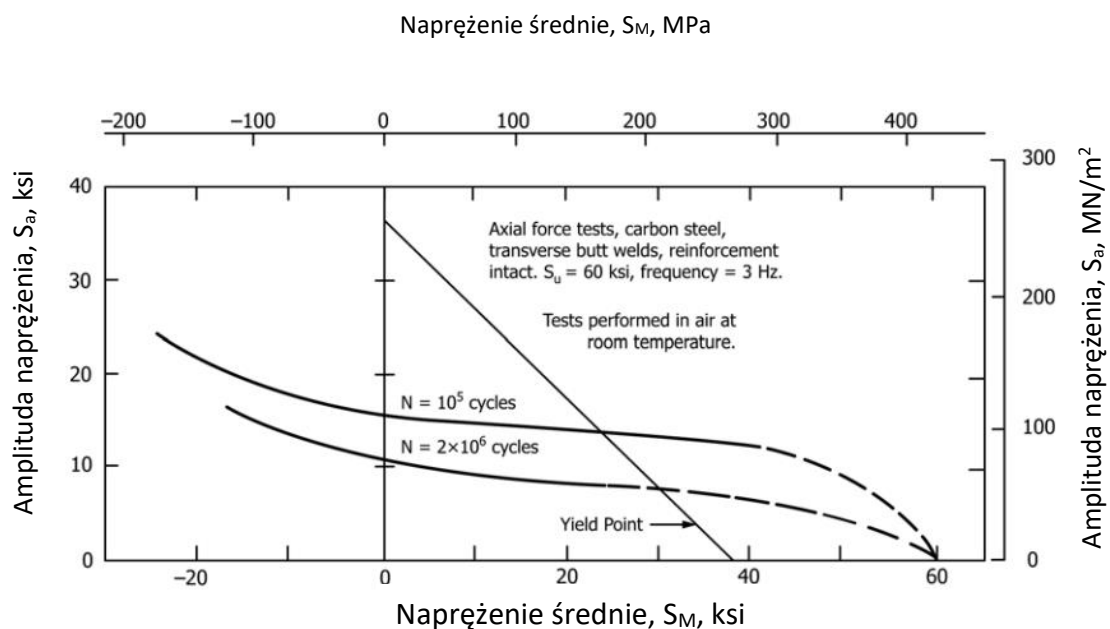
W celu umożliwienia porównania wyników badań uzyskanych na podstawie badań w różnych ośrodkach badawczych konieczne jest usystematyzowanie procedury badawczej. Bardzo przydatne w tym celu są normy i ogólnie przyjęte przepisy. W zależności od potrzeb można korzystać z norm amerykańskich bądź europejskich. W krajach anglosaskich w znacznej mierze bazuje się na przepisach ASTM jak np. E466 i E468 [50], [51] a także przepisy budowlane ANSI/AISC 360 [52]. W Europie stosowana jest norma DIN 50100 [53], ISO 1099 [54] a także zbiór wytycznych projektowych Eurokody [12].

2.4.1. Wymagania normy ASTM E466

Dla przeprowadzenia badania z stałą amplitudą obciążenia można przywołać normy ASTM E 466 [51] przedstawiająca sposób prowadzenia badania z kontrolowaną siłą dla zapewnienia stałej amplitudy oraz ASTM E 468 [51] opisująca sposób prezentacji wyników w oparciu o ASTM E 466. Normy te nadają się jedynie dla próbek z i bez karbu. Nie można ich stosować do badania elementów konstrukcyjnych. Norma dopuszcza 4 rodzaje próbek, po 2 o przekroju okrągłym i prostokątnym. Zaleca się by próbki przeznaczone do badań zmęczeniowych były wykończone poprzez polerowanie.

Szczegółowa geometria jest zamieszczona w normie. Badanie należy przeprowadzić na maszynach zmęczeniowych mechanicznych, elektromechanicznych bądź magnetycznych, hydraulicznych lub elektrohydraulicznych. Maszyna musi być wyposażona w system monitorowania siły, szczególnie w początkowym okresie badania i odchyłka nie powinna przekraczać 2%. Częstotliwość badania należy dobrać w zakresie pomiędzy 10^{-2} a 10^2 Hz w zależności od materiału próbek. Przyjmuje się, że w tym zakresie częstotliwość badania nie wpływa znacząco na trwałość. Badanie prowadzi się do osiągnięcia założonej liczby cykli bądź do wcześniejszego zniszczenia próbki.

Dla przeprowadzenia badań z stałym odkształceniem należy posłużyć się normą ASTM E606 [52] z wykorzystaniem dedykowanych tej próbie próbek. Badanie zmęczeniowe kontrolowane odkształceniem jest zjawiskiem, na które wpływ mają te same zjawiska co na próbki z stałym obciążeniem. Cykliczne odkształcenie należy mierzyć a odkształcenie plastyczne wyznaczać. Wyniki badań z stałym odkształceniem umożliwiają empiryczne wyznaczanie zależności pomiędzy zmiennymi cyklami zmęczenia, odkształceniem całkowitym, plastycznym a trwałością zmęczeniową. Przykładowy wykres trwałości zmęczeniowej przedstawiony na rysunku 20.



Rysunek 20. Przykładowy wykres trwałości zmęczeniowej [51]

2.4.2. Wytyczne przepisów budowlanych ANSI/AISC 360

Zbór przepisów ANSI/AISC 360 przeznaczony jest dla strukturalnych stalowych budynków. Zmęczenie materiałów należy uwzględnić w swoich obliczeniach dla powtarzających się obciążeń. Pod uwagę należy brać liczbę cykli obciążeń, wielkość naprężeń oraz koncentrację w poszczególnych obszarach konstrukcji. Nie należy brać pod uwagę obciążeń o małej liczbie cykli – znacznie poniżej 10^4 cykli. Również nie należy uwzględniać obciążeń sejsmicznych i obciążeń wiatru na powierzchnie boczne konstrukcji. Przy niskiej liczbie cyklicznych obciążeń rozciągających osiągnie się punkt, w którym inicjacja pęknięcia zmęczeniowego nie nastąpi – definiuje się to jako próg zmęczenia F_{TH} . Normę tę stosuje się do elementów konstrukcyjnych i połączeń poddawanych obciążeniom wysokocyklowym w zakresie sprężystych naprężeń o częstotliwości i wielkości wystarczającej do inicjacji pęknięcia i jego dalszego rozwoju prowadzącego do zniszczenia.

Zakłada się, że maksymalne dopuszczalne naprężenie szczytowe nie będzie przekraczało $0,66 F_y$ (granicy plastyczności). W przypadku cyklicznych obciążeń rozciągająco-ściskających powinno się uwzględnić sumę tych naprężeń. Zakłada się, że konstrukcja będzie zabezpieczona przeciw korozji lub będzie pracować w normalnym otoczeniu atmosferycznym.

Obliczone naprężenia należy uwzględnić w zakresie sprężystym i nie powinno być korbów koncentrujących naprężenia. Elementy konstrukcji należy tak projektować by miejsca połączeń i spoiny były możliwie symetryczne względem osi danego elementu. W przypadku mimośrodowych naprężeń wynikających z projektu należy je uwzględnić w obliczeniach zakresu naprężeń.

Wnioski bazujące na szeregu badań pełnowymiarowych próbek i analizie teoretycznej:

- zakres naprężeń i nasilenie karbu są dominującymi zmiennymi naprężeń dla spawanych detali i belek,
- naprężenia minimalne, średnie i maksymalne nie są istotne dla celów projektowych,

- stale konstrukcyjne z granicą plastyczności między 250 a 690 MPa nie różnią się znacząco pod względem wytrzymałości zmęczeniowych materiałów litych czy spawanych.

Cykliczne obciążenia nie obejmujące naprężeń rozciągających nie inicjują pęknięć i nie są uważane ze obciążenie zmęczeniowe. Jednak w przypadku elementów podlegających wyłącznie naprężeniem ściskającym pęknięcia zmęczeniowe mogą wystąpić w obszarze o wysokim poziomie naprężeń szczątkowych rozciągających. Z reguły w takich przypadkach pęknięcia nie propagują poza obszar szczątkowych naprężeń rozciągających z uwagi na usunięcie naprężeń poprzez pęknięcie materiału. W przypadkach cyklicznego odwracania naprężeń obliczany zakres musi sumować naprężenia ściskające i rozciągające wynikające z różnych kierunków lub układów przyłożenia obciążenia.

Dla materiałów bazowych i spawanych odporność zmęczeniową wyznacza się z zależności liczby cykli do naprężeń.

$$N = \frac{C_f}{S_r^n} \text{Log} N = A - n \text{Log} S_r,$$

(1)

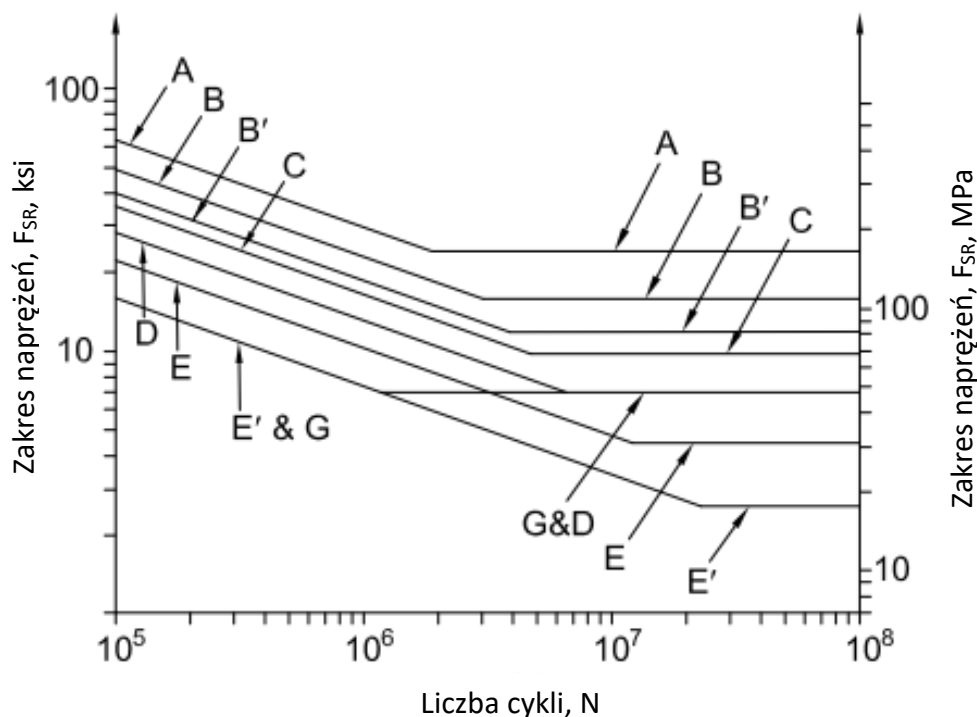
gdzie:

C_f – stała uzależniona od kategorii zmęczeniowej,

S_R – zakres naprężeń,

N – liczba cykli.

Na podstawie wzoru (1) wyznaczono krzywe przedstawiające odporność na zmęczenie. W zależności od szczegółu konstrukcyjnego dobiera się inną krzywą – od A do G, dla szacowania trwałości zmęczeniowej. Tabela z podziałek i przykładami zawarta jest w normie.



Rysunek 21. Odporność zmęczeniowa według ANSI [52]

Zależnie od rodzaju połączenia i obciążenia należy uwzględnić inny obszar do projektowania. Każda z krzywych odpowiada innej kategorii zmęczeniowej przedstawionych w normie ANSI 360 [52].

2.4.3. Niemieckie przepisy DIN 50100

Główna norma stosowana w Europie, dla badań zmęczeniowych złączy spawanych, to niemiecka norma DIN 50100 [53] opisująca przeprowadzenie i ocenę wyników cyklicznej próby zmęczeniowej na stałej amplitudzie siły w trakcie badania na próbkach lub komponentach. Wytyczne analiz zawartych w ramach normy określają przedział rozpatrywanej trwałości w zakresie od 10^4 do 10^7 cykli. Ekstrapolacja krzywych wykresu Wöhlera poza ten zakres jest niezgodne z proponowanymi wytycznymi.

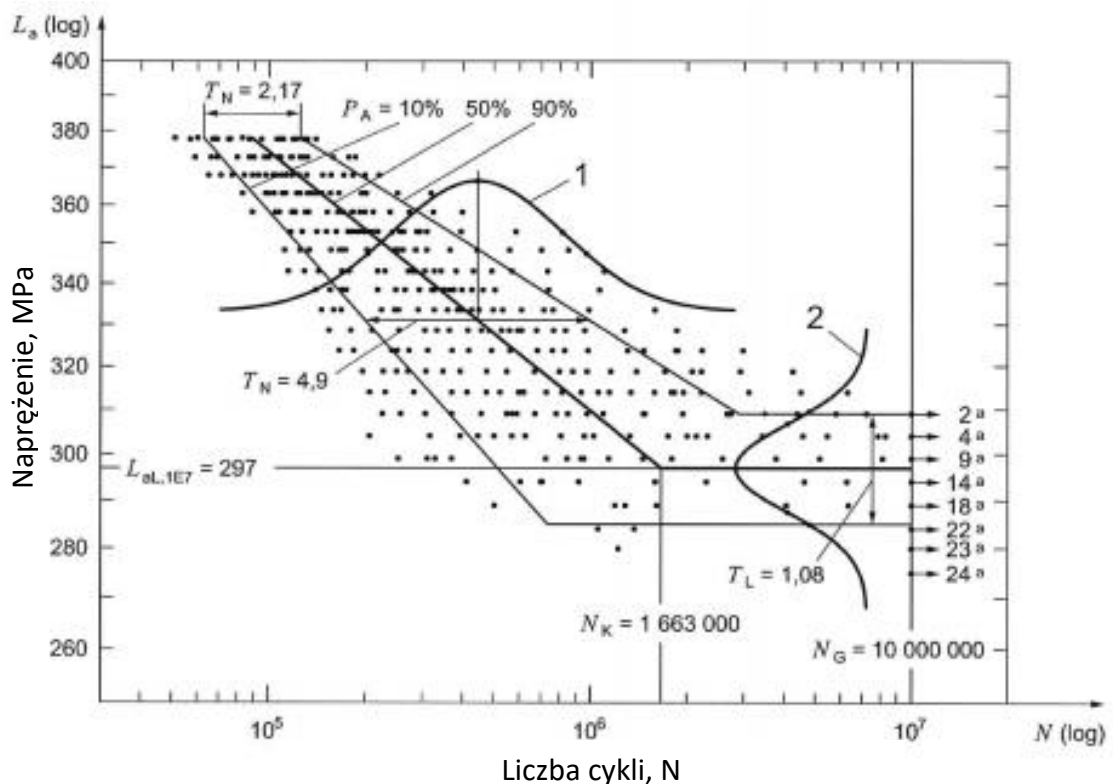
Na zgodność badań eksperymentalnych z rzeczywistą konstrukcją mogą wpływać następujące czynniki: zgodność mikrostrukturalna z rzeczywistym elementem, stan powierzchni. Zaleca się by powierzchnie próbek były polerowane z uwagi na znaczny wpływ chropowatości powierzchni na wynik badania. Norma dopuszcza wykorzystanie maszyn zmęczeniowych z różnym napędem do wygenerowania cyklicznych obciążeń m.in. serwohydrauliczne, serwopneumatyczne, elektromechaniczne czy elek-

dryhydrauliczne. Amplituda cykli powinna być powtarzalana z dopuszczalnym odchyleniem wynoszącym 3%. Nie określa z jaką częstotliwością należy obciążać próbkę, podaje jedynie, że badanie powinno być prowadzone w temperaturze otoczenia pomiędzy 10 a 35°C. W trakcie badania temperatura próbki nie może wzrosnąć o wartość:

- $\Delta T = 30K$ dla materiałów przestrzennie centrowanych – stale ferrytyczne, żelaza,
- $\Delta T = 20K$ dla materiałów ściennie centrowanych oraz heksagonalnych– stale austenityczne, aluminium, mages i tytan.

Zniszczenie próbki zachodzi zawsze w obszarze wysokocyklowym, jeśli zniszczenie nie nastąpiło w tym zakresie przy założonych parametrach obciążenia przyjmuje się, że próbka jest negatywna lub poza zakresem.

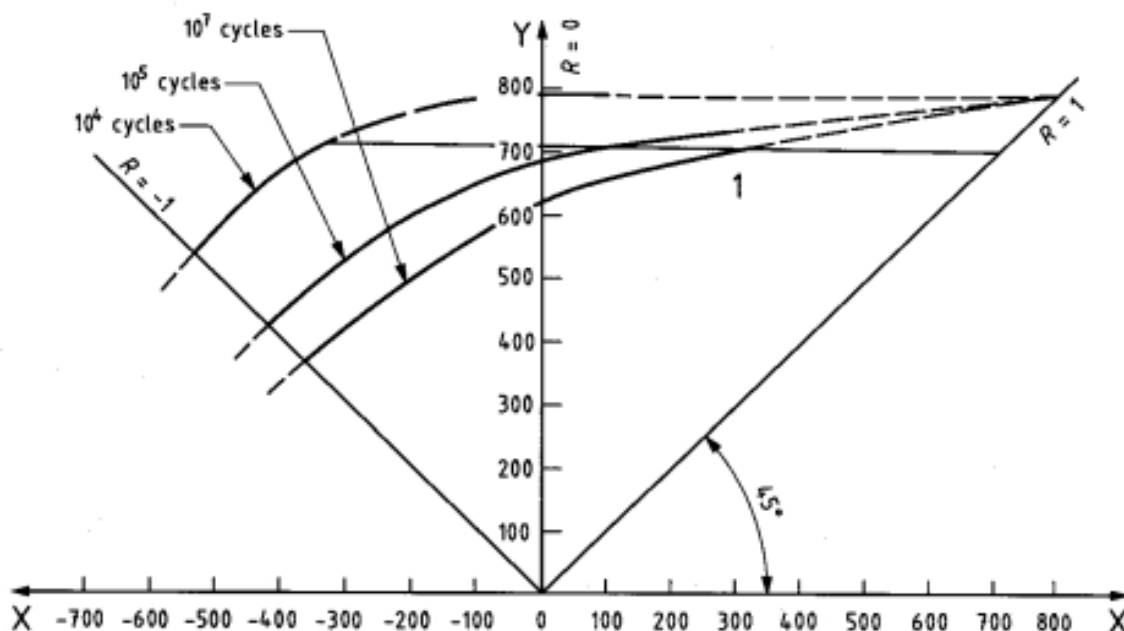
Wyniki przedstawione na wykresie zmęzeniowym S-N – rysunek 21, umożliwiają wyznaczenie naprężenia średniego oraz rozrzut wyników przy poszczególnych obciążeniach.



Rysunek 22. Przykładowa charakterystyka S-N prezentująca wyniki badania [53]

2.4.4. Normy międzynarodowe – ISO 1099

Norma ISO 1099 odnosi się do badania zmęczeniowego ze stałą amplitudą i kontrolowaną siłą w normalnej temperaturze otoczenia na próbkach metalicznych. Norma przeznaczona do badania próbek o przekroju okrągłym i prostokątnym bez karbów. Przed rozpoczęciem badania warunki jego przeprowadzenia jak współczynnik naprężenia, geometrię i ilość próbek oraz jakie parametry chce się wyznaczyć wskutek prowadzenia próby. Zakłada się maksymalną trwałość zmęczeniową na poziomie maksymalnym 10^7 cykli dla stali konstrukcyjnych oraz 10^8 dla niestopowych. Wyniki najlepiej przedstawić na wykresie S-N Woehlera z wyznaczoną linią przedstawiającą uśrednione wyniki trwałości. Jako pochodne można wyniki można przedstawić na wykresie amplituda naprężenia-średnie naprężenie, maksymalne i minimalne naprężenie w stosunku do średniego (wykres Smitha) lub maksymalne naprężenie w stosunku do minimalnego (wykres Rosa). Graficzne przedstawienie wyników umożliwi łatwe określenie dopuszczalnych obciążeń przy założonej liczbie cykli.



Rysunek 23. Naprężenia maksymalne w stosunku do minimalnych [54]

X – naprężenia minimalne, σ_{min} , MPa

Y – naprężenia maksymalne, σ_{max} , MPa

1 – Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$

2.4.5. Przepisy europejskie Eurocode 3 – EN 1993

Eurokody to grupa norm (łącznie 59) opracowanych w celu unifikacji wymogów konstrukcyjnych dla konstrukcji na terenie Unii Europejskiej, podzielonych z uwagi na użyty materiał konstrukcyjny. W roku 1975 został zapoczątkowany program mający na celu usunięcie ograniczeń w handlu i zharmonizowanie warunków technicznych na terenie Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej. Część Eurocode 3 EN 1993 1-9 [11] dotyczy projektowania z uwzględnieniem trwałości zmęczeniowej. Sugerowane metody bazują na wynikach badań próbek z uwzględnieniem niedoskonałości jakościowych powierzchni i produkcyjnych materiałów, naprężeń szczątkowych z procesów spawalniczych. Zalecenia te można stosować wyłącznie dla stali konstrukcyjnych i stopowych oraz dla konstrukcji wykonywanych w oparciu o PN EN 1090 [56]. Wytyczne bazują na trwałości wyznaczonej metodą stałej amplitudy i nie mogą zostać użyte dla metody odkształceniowej czy bazującej na klasycznej mechanice pęknięcia. Nie uwzględnione są obróbki powykonawcze w celu poprawy trwałości zmęczeniowej. Zakłada się, że konstrukcja pracować będzie w normalnych warunkach atmosferycznych bez wzmożonego zagrożenia korozyjnego i temperaturze nie przekraczającej 150°C.

Konstrukcje należy oceniać pod kątem odporności na uszkodzenie bądź długotrwałej odporności zmęczeniowej. Przy założeniu odporności na uszkodzenie należy uwzględnić trwałość zmęczeniową w stosunku do projektowanego okresu użytkowania przy założeniu regularnych kontroli i konserwacji. Można zastosować tą metodę projektowania, jeśli obciążenie konstrukcji z uszkodzonego elementu zostanie przeniesione na inne.

Metoda bezpiecznego użytkowania bez przewidywanego uszkodzenia w czasie projektowanego czasu użytkowania powinna być stosowana tam, gdzie uszkodzenie jednego elementu konstrukcyjnego niesie za sobą zagrożenie dla całej konstrukcji. Uwzględnić należy karby geometryczne i metalurgiczne oraz podanie obszarów, w których nastąpić może uszkodzenie.

Współczynniki projektowe dla stali od podwyższonych wytrzymałościach można znaleźć w części 1-12 Normy EN 1993 [11]. Jednak ograniczają się one jedynie dla stali w gatunku do S700 – czyli do maksymalnej granicy plastyczności równej 700MPa.

Wszystkie gatunki powyżej tej wytrzymałości nie są uwzględnione oraz nie jest możliwe do zastosowania dla wyższych gatunków. Stale wyższych gatunków można poddać globalnej nieliniowej analizie uwzględniającej częściowe uplastycznienie w elementach konstrukcyjnych.

3. Zjawisko zmęczenia, przegląd literatury

Badanie stali od podwyższonych wytrzymałościach stawia szczególne wymagania co do wyposażenia badawczego. Wraz z wzrostem wytrzymałości na rozciąganie maleje potencjalna liczba maszyn wytrzymałościowych zdolnych do generowania obciążenia na próbkę przeznaczoną do badań zmęczeniowych.

Pierwsze badania przeprowadzone przez Wöhlera sięgają końcówki XIX w. Zauważył on, że wytrzymałość statyczna nie jest taka sama dla cyklicznie obciążanych elementów zespołów jezdnych na kolei [57]. W swoich badaniach dążył do określenia obciążenia, przy którym nie zachodzi zniszczenie próbki. Wcześniej, ok. 1833 Wilhelm Albert rozpoczął dociekania, dlaczego kopalniane łańcuchy transportowe ulegały zniszczeniu. Zauważył nie tylko obciążenie, ale również ich częstość wpływa na żywotność łańcuchów. By temu zapobiec opracował linię plecioną z drutów żelaznych. W podobnym czasie Jean Victor Poncelet wprowadził termin zmęczenia metalu i porównuje do zmęczenia człowieka. Z biegiem lat coraz więcej uczonych zajmowało się tematyką zmęczenia. W wielu dziedzinach przemysłu nadal nie uwzględnia się w znacznym stopniu wpływu zmęczenia na produkt końcowy.

3.1. Charakterystyki naprężeniowe

Wykres Wöhlera jest najstarszym i nadal jednym z podstawowych narzędzi oceny trwałości zmęczeniowej. Wykres uzyskuje się poprzez przebadanie próbek wzorcowych przy różnym poziomie obciążenia. Szczegółowo zostało to przedstawione w normie DIN 50100 [53]. Wykres wyznacza się z zależności:

$$\sigma_a = A + m \log N_f, \quad (2)$$

gdzie:

σ_a – amplituda naprężenia,

N_f – trwałość liczona w cyklach,

A, m – stałe modelu regresji.

Postać podwójnie logarytmiczna równania (2), zaproponowana przez Basquina, ma postać:

$$\log N_f = A' + m' \log \sigma_a, \quad (3)$$

gdzie:

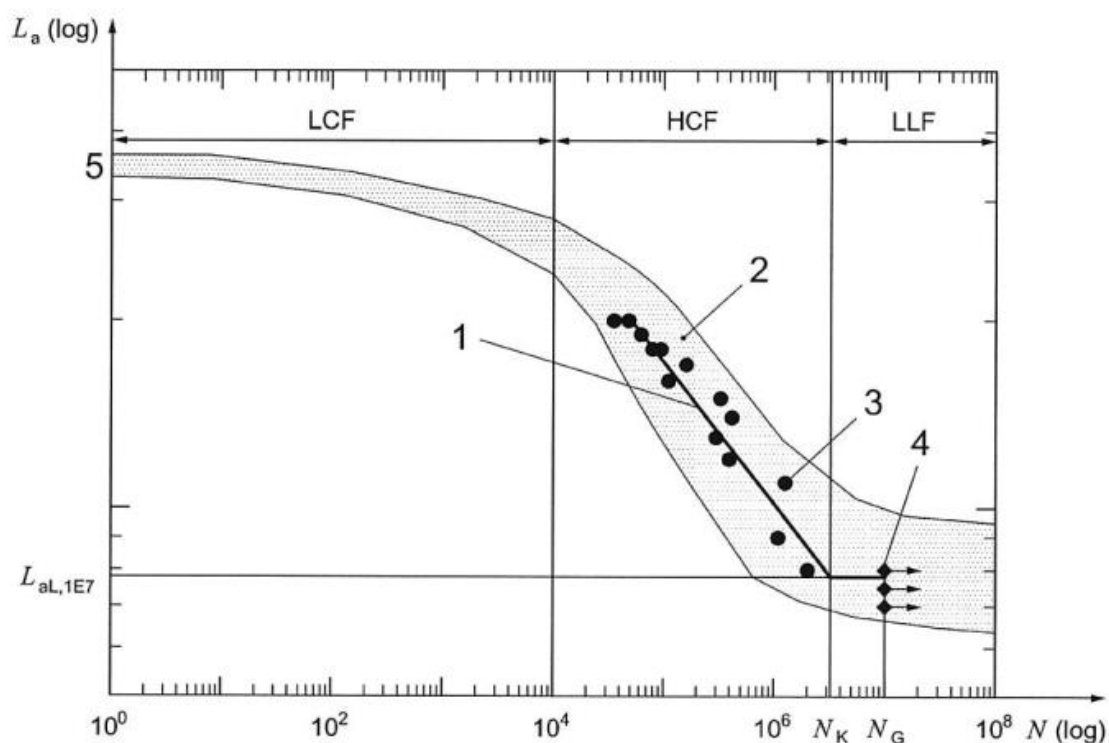
σ_a – amplituda naprężenia,

N_f – trwałość liczona w cyklach,

A' , m' – stałe modelu regresji dla modelu Basquina.

Na osi rzędnych z reguły podane są naprężenia cykli σ_a (MPa) a na osi odciętych liczba cykli N w skali logarytmicznej $\lg N$. Krzywa wykresu S-N jest z reguły dzielona na 3 części. Przedstawiają one zakres niskiej wytrzymałości zmęczeniowej LCF do ok. 10^4 cykli, obszar o wysokiej trwałości zmęczeniowej HCF wyznaczanym do punktu załamania krzywej – z reguły do ok. 10^6 cykli. Trzeci zakres to obszar długotrwałej wytrzymałości zmęczeniowej LLF wyznaczany od punktu załamania krzywej. Punkt załamania może zostać wskazany jedynie na podstawie badań eksperymentalnych. Jeśli nie zostały wykonane to jako koniec zakresu trwałości wysokocyklowej uznaje się próbkę o maksymalnej liczbie cykli.

Za stosowaniem wykresów naprężeniowych przemawia duża ilość dostępnych charakterystyk dla różnych materiałów oraz prostota odczytu.



Rysunek 24 Schematyczna charakterystyka Wöhlera [53]

Na rysunku 24 przedstawiono schematycznie obszary trwałości (LCF, HCF, LLF), wyniki badań eksperymentalnych a także obszar rozproszenia wyników. Na tej podstawie wyznaczona zostaje krzywa S-N.

3.2. Wykresy odkształceniowe

Wykresy odkształceniowe bazują na pomiarach amplitudy odkształcenia. Basquin a później Manson, Coffin stwierdzili, że występuje zależność pomiędzy odkształceniem a liczbą półcykli. Można to wyrazić za pomocą modelu Mansona-Coffina-Basquina wyrażonego równaniem:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon_{a,t}$ – amplituda odkształcenia całkowitego,

$\varepsilon_{a,e}$ – amplituda odkształcenia sprężystego,

$\varepsilon_{a,p}$ – amplituda odkształcenia plastycznego,

$2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia (półcykli),

E - moduł Younga,

σ'_f, b – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,

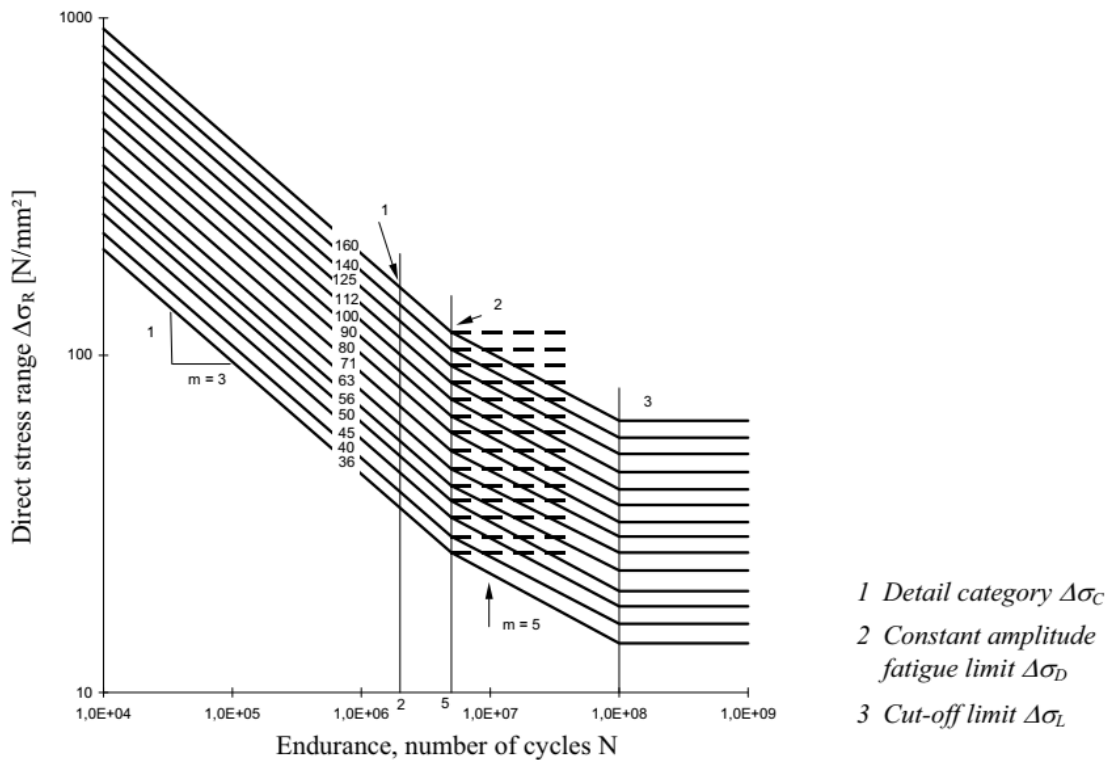
ε'_f, c – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego.

3.3. Dane dostępne w normach i literaturze dla gatunków od S690 do S1100

Normy materiałowe czy badawcze z pewnym opóźnieniem publikują wyniki badań i bazujące na nich wytyczne. W znanych normach związanych z badaniami zmęczeniowymi jest mowa o stalach konstrukcyjnych o „standardowych” parametrach wytrzymałościowych – tj. granicy plastyczności nie przekraczającej 700 MPa i typowej drobnoziarnistej strukturze. Stale o podwyższonych wytrzymałościach, przekraczających 700 MPa w znacznej mierze nie są uwzględnione w wytycznych projektowych jak np. Eurocode. Z uwagi na specyfikę tych materiałów wraz z ich wyższą wytrzymałością spada ilość dostępnych publikacji. Związane jest to bezpośrednio z możliwościami maszyn wytrzymałościowych/zmęczeniowych. Chcąc obciążyć normatywną okrągłą próbkę zmęczeniową o średnicy 5 mm siłą odpowiadającą granicy plastyczności to dla stali S355 konieczne będzie przyłożenie 7kN, dla stali S690 prawie dwukrotnie więcej, bo ok 14 kN. Dla stali S1100 będzie to już ponad trzykrotnie więcej, bo aż niespełna 22kN. Dobos i Lukas [29], [58] zastosowali w swym badaniu próbki płaskie z stali S690, generując naprężenie ok. 700 MPa odpowiadające granicy plastyczności. Maksymalna siła wynosiła ok 100 kN, jednak zamieniając gatunek stali na S1100 przy zachowaniu warunków obciążenia – do granicy plastyczności, konieczne jest wygenerowanie 60% większej siły, bo ok 160 kN.

Niestety w żadnej mi znanej normie nie znalazłem wytycznych projektowych dla stali UHSS o granicy plastyczności powyżej 700 MPa. Zalecenia Eurocode-ów kończą się na gatunku S700 [12]. Według tych przepisów należy uwzględniać wszystkie efekty oddziaływania i odkształcenia oparte na analizie liniowo-sprężystej elementów konstrukcyjnych i połączeń. Naprężenia normalne i ścinające w materiałach podstawowych i spoinach należy obliczyć dla obszarów potencjalnie zagrożonych inicjacją uszkodzeń

zmęczeniowych. Ocenę przeprowadza się w oparciu o naprężenia normalne, ich modyfikacje z uwagi na geometrię konstrukcji w danym obszarze lub gradientów naprężeń poblizu grani spoiny. Projektowe naprężenia powinny być przyjęte dla równoważnych naprężeń stało amplitudowych przy założonej żywotności konstrukcji $N_c = 2 \cdot 10^6$ cykli. Korzystając z rysunku 25 można odczytać współczynnik wynoszący $m = 3$ dla zakresu mniejszego niż $N = 5 \cdot 10^6$.



Rysunek 25. Charakterystyki zmęczenia dla bezpośrednich zakresów naprężeń [11]

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \cdot 10^6 \text{ gdzie } m = 3 \text{ dla } N \leq 5 \cdot 10^6,$$

(5)

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta\sigma_C = 0,737\Delta\sigma_C,$$

(6)

Wartość $0,737\Delta\sigma_C$ jest graniczną wartością zmęczenia przy stałej amplitudzie.

Z racji swoich parametrów wytrzymałościowych stale o podwyższonych wytrzymałościach są obiecującym materiałem dla wielu gałęzi przemysłu. Nie tylko w budowie maszyn dźwigowych czy pojazdów transportowych, również w budownictwie stawia się ogromne oczekiwania do możliwości. Materiały te oferują niespotykaną dla

innych gatunków stali stosunek wytrzymałości do wagi. Dzięki dobrej spawalności możliwe jest łączenie w trwałe konstrukcje przestrzenne. Szeroko w literaturze jest wspomniany fakt, że mimo iż te stale bardzo zmodernizowały by budownictwo brakuje wytycznych projektowych dla zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji [58]. Zalecenia projektowe kończą się na stalach o granicy plastyczności nie przekraczającej 700 MPa.

Wraz z wzrostem wytrzymałości trwałość zmęczeniowa nie ulega drastycznej poprawie. Żywotność tych stali jest na podobnym poziomie co stali drobnoziarnistych o „przeciętnych” wytrzymałościach w granicach 235 - 460 MPa. Materiały o granicy plastyczności powyżej 700 MPa cechuje spora niewrażliwość na prędkość odkształcenia [59]. Nie można znaleźć dużej liczby prac, w których badacze zajęli się wyłącznie badaniami zmęczeniowymi stali wysokowytrzymałych. W zdecydowanej większości skupiają się na badaniu złączy spawanych i obciążaniu próbek wzorowanych na rzeczywistych geometriach połączeń. Istotnym parametrem decydującym o trwałości stali wysokowytrzymałych jest możliwie drobnoziarnista struktura o jak najmniejszej skali niezgodności strukturalnych. W pracach [28], [60] Kucharczyk i inni oraz Schork poruszają problem geometrii złącza na mechanikę pęknięcia i trwałość stali wysokowytrzymałej.

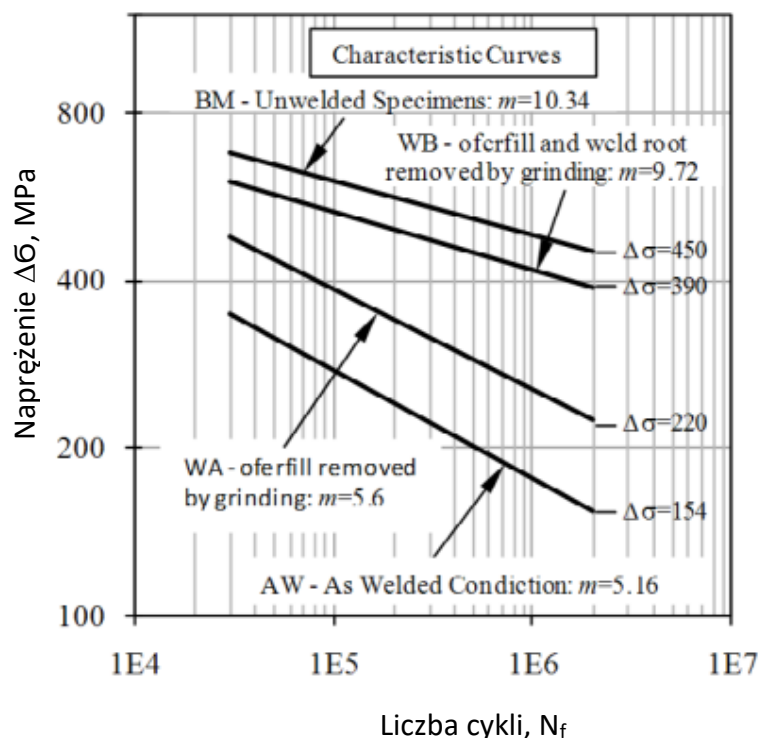
3.4. Dane dostępne w normach i literaturze dla złączy spawanych

W czasopiśmie naukowych dostępnych jest duża liczba publikacji związanych z tematyką badań zmęczeniowych złączy spawanych ze stali o podwyższonych wytrzymałościach. Jednak liczba publikacji jest odwrotnie proporcjonalna do wytrzymałości badanej stali. Wraz z wzrostem granicy wytrzymałości spada liczba dostępnych publikacji. Przyczynę takiej sytuacji należy dopatrywać się możliwościach sprzętowych ośrodka badawczego jak i możliwości technologicznych wykonania prawidłowego złącza spawanego tych stali. Można zauważyć również dużą korelację ośrodków badawczych zlokalizowanych w niedalekiej odległości od producentów wytwarzających stale wysokowytrzymałych HSS i bardzo wysokowytrzymałych UHSS (Szwecja, Finlandia, Niemcy). Potencjalnie najwięcej występuje publikacji z gatunku S690. Widoczny jest wyraźny trend ku intensyfikacji badań stali o granicy plastyczności wyraźnie ponad 900 MPa.

Jednym z pierwszych polskich badaczy przedstawiających korzyści z stosowania nowoczesnych stali o podwyższonych wytrzymałościach był Węglowski [61]. W swojej pracy charakteryzuje cechy wyróżniające tą grupę stali. Przedstawia dostępność pod różnymi nazwami handlowymi. Szczegółowo analizuje skład chemiczny i bazującą na niej spawalność. Przywołuje zalecenia producentów stali dla prawidłowego wykonania złączy, porównuje właściwości wytrzymałościowe z w różnych temperaturach badania.

Klimpel i inni w swojej pracy [62] przedstawiają wyniki badań wytrzymałościowych i strukturalnych na złączach wykonanych z stali w gatunku S690 i S960. Sugerują by uwzględniać energię liniową spawania określoną przed wytwórcę blach jako maksymalnie dopuszczalną.

Costa, Ferreira i Abreu w swojej pracy [63] rozważają trwałość zmęczeniową spawanych złączy z stali o wysokiej wytrzymałości w odniesieniu do promienia linii wtopienia. W swoich badaniach wykorzystali stal DOMEX 600DC. Złącze wykonano na „X” metodą 135, następnie poddane badaniom metalograficznym i pomiarowi twardości. Próbkę do badań zmęczeniowych badano w stanie jak po spawaniu. Poddano je cyklicznemu obciążeniu z sinusoidalnym charakterem obciążenia i częstotliwością 20 Hz oraz współczynnikiem asymetrii cyklu naprężenia $R=0$. Pomiar twardości wykazał wyraźny spadek twardości w SWC, przy czym największe gradienty twardości zmierzono w rdzeniu próbki. Próbkę zmęczeniową w stanie jak po spawaniu AW wykazały znacznie niższą trwałość niż sam materiał w stanie wyjściowym BM. Próbkę na której usunięto nadlew spoiny – WA oraz WB, poprzez szlifowanie charakteryzowały się trwałością w zakresie pomiędzy materiałem surowym a w stanie po spawaniu. Z czego próbki WA miały ok. 44% wyższe naprężenie niszczące od materiału w stanie po spawaniu. Próbkę z usuniętym licem WA charakteryzowały się naprężeniem niszczącym $\Delta\sigma = 220$ MPa i współczynnikiem $m=5,6$. Próbkę z usuniętymi nadlewem lica i grani odpowiednio $\Delta\sigma = 390$ MPa i współczynnikiem $m=9,72$.



Rysunek 26. Porównanie charakterystyk zmęczeniowych S-N uzyskanych dla czterech serii próbek [63]

Koncentracja naprężeń w narożu spoiny oraz wewnętrzne defekty w pobliżu naroża spoiny są głównymi czynnikami powodującymi spadek wytrzymałości zmęczeniowej. Usunięcie nadmiaru spoiny przez szlifowanie przyczynia się do znacznej poprawy wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu ze stanem po spawaniu. Można zatem stwierdzić, że koncentracja naprężeń w narożu spoiny oraz wewnętrzne defekty w pobliżu lica i grani spoiny są głównymi czynnikami powodującymi obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej.

Goss, Marecki i Grzelak [63] analizują w swej pracy trwałość zmęczeniową stali S960QL – pod handlową nazwą XABO 960. Zmierzono również poziom naprężeń własny metodą rentgenowską. Wykonane zostały złącza doczołowe, metodą 141/TIG/GTAW. Badanie zmęczeniowe prowadzono z stałym obciążeniem i zerową wartością średnią. Dowodzą, że próbki w stanie po spawaniu cechują się niższą trwałością niż materiał bazowy. Próbki o zadanym naprężeniu powyżej granicy plastyczności osiągnęły 7000 cykli przed zniszczeniem. Zauważono, że amplituda odkształcenia plastycznego szybko maleje, stabilizując się na stałym poziomie do zniszczenia próbki. Pomiary naprężeń własnych wykazały, że najwyższe naprężenie jest w spoinie oraz na granicy pomiędzy SWC a materiałem bazowym. Analiza metalograficzna wykazała, że

miejsca inicjacji pęknięć wystąpiły w obszarze linii wtopienia jako kruche pęknięcia. Stwierdzono, że występuje znaczna ilość kruchych siarczków wpływających na pęknięcia zmęczeniowe, co objawia się występowaniem pęknięć od przełomu. Proces wzrostu pęknięć zarówno próbek z materiału bazowego jak i z spoiną zachodzi w sposób bardzo szybki. O czym świadczą liczne pęknięcia wtórne generujące lokalne zmiany. W trakcie badań właściwości zmęczeniowych stali S960QL i jej połączeń spawanych stwierdzono cykliczne umacnianie materiału przy obciążeniach od zerowego do stałego naprężenia maksymalnego. Pomiar naprężeń szczątkowych w złączach spawanych wykazały wartości dodatnie, co w połączeniu z naprężeniem pochodzącym od siły zewnętrznej może powodować obniżenie trwałości zmęczeniowej badanego złącza spawanego, które zaobserwowano w czasie badanej trwałości. Możliwe jest zwiększenie trwałości zmęczeniowej złącza spawanego poprzez wprowadzenie naprężeń ściskających w obszarze złącza, na przykład przez kulowanie.

Nowacki, Sajek i Matkowski [65] analizują parametry spawania na mikrostrukturę stali S1100QL. Złącza wykonano metodą 135/MAG/GMAW a energią liniową wprowadzono pomiędzy 5,5 a 7,1 kJ/cm. Wykonano pomiary twardości, badanie wytrzymałościowe i udarność oraz metalografię. Stosowanie wyższej energii liniowej skutkowało dłuższym czasem przejścia $t_{8/5}$ i tym samym negatywnie wpłynęło na wytrzymałość materiału. Stwierdzono, że mimo spawania materiałem dodatkowym niededykowanym tej stali możliwe jest uzyskanie złącza o wytrzymałości wyższej niż minimalna dla tego gatunku. Właściwy dobór energii liniowej wpływa korzystnie na wytrzymałość, twardość i strukturę złącza.

Zerbst, Madia, Schork i Kucharczyk oraz inni [28], [59], [65] w swych publikacjach skupiają się na wpływie geometrii złącza na trwałość zmęczeniową stali. W pracy [67] analizują wpływ promienia linii wtopienia na trwałość zmęczeniową stali S355NL, badania tym samym tokiem kontynuują w pracy [28], [60] gdzie dodatkowo uwzględniają stale o podwyższonej wytrzymałości. Złącza zostały wykonane metodami 141/TIG/GTAW i 135/MAG/GMAW. Badania prowadzono z cyklicznym naprężeniem odkształcającym. Przyjąć należy, że wraz z wzrostem promienia przejścia z materiału w spoinę wzrasta trwałość zmęczeniowa jednocześnie wraz z wzrostem nadlewu spoiny trwałość ta spada. Rozważają trwałości dla gatunku S960QL i wykonane z nich złącza

krzyżowe oraz doczołowe. W pracy [28] zwracają uwagę na obciążenia cieplne materiału bazowego i lokalne obróbki cieplne wynikające z procesu spawania oraz degradację materiału wskutek tego. Dla przedstawienia degradacji wykonane zostały badania wytrzymałościowe – udarność i pomiar twardości, oraz metalograficzne z analizą składu chemicznego poszczególnych obszarów złącza. Badanie zmęczeniowe odbywało się z stopniowym zwiększaniem naprężenia – 20 MPa co 9000 cykli. W trakcie badania mierzono temperaturę próbek. Wzrost temperatury nastąpił od ok. 260 MPa i związany jest z odkształceniem mikroplastycznym i propagacją mikropęknięć, a odpowiadającym im poziom amplitudy naprężeń koreluje z granicą wytrzymałości zmęczeniowej. Dla symulacji wyników zmęczeniowych spoiny zastosowano metodę IBESS [68] która zapewnia dużą korelację z wynikami eksperymentalnymi dla obciążeń cyklicznych.

Samardzic oraz Dunder i inni [69]–[71] w swoich publikacjach skupili się na sprawdzeniu właściwości wytrzymałościowych i spawalności stali S1100QL oraz S960QL. Wykonali złącza metodą 135/MAG/GMAW i analizowali wpływ samego procesu spawania i różnych jego parametrów na strukturę i wytrzymałość tych stali. Złącza zostały wykonane z energią liniową pomiędzy 0,83 – 1,17 kJ/ mm

Podobną analizę przeprowadzili Łomozik i Turyk [72] po wykonaniu złączy metodą MAG/138 z wykorzystaniem proszkowego materiału dodatkowego. Wykonane zostały płyty dla symulacji wielokrotnego obciążenia cieplnego wskutek napraw złącza. Złącza zostały wykonane niskimi energiami linowymi na poziomie 0,48 – 0,82 kJ/ mm. Wysuwają hipotezę, że wielokrotne spawanie z podobnymi parametrami (w tym przypadku 4-krotne spawanie [58]) nie obniża znacząco wytrzymałości złącza i nie degraduje materiału bazowego.

Amrei, Ahola i inni w swojej pracy [73] skupiają się na poznaniu wpływu parametrów spawania na właściwości wytrzymałościowe stali wysokowytrzymałościowych. W pracy badają zmiany zachodzące w złączach wykonanych z gatunków S700, S960 oraz S1100. Złącza wykonano metodą MAG/135/GMAW przy 2 wartościach energii liniowej wprowadzonej do złącza, przy czym niska energia była ok. połowę niższa od wysokiej. Odpowiednio 1,4 kJ/mm dla wysokiej i ok. 0,7 kJ/mm dla niskiej energii liniowej. Wykonano również złącza używając lasera i uzyskując energię liniową o wartości 0,3 kJ/ mm.

Po szeregu badań wytrzymałościowych, pomiarze twardości i analizie metalograficznej wysuwają wniosek, że najmniej degradującą metodą łączenia jest spawanie laserowe. Przemawiają za tym wyniki prób rozciągania, będące nieznacznie gorsze od materiałów bazowych. Również rozkład i wartość twardości są najkorzystniejsze spośród wykonanych płyt.

Ahola [74] z zespołem analizują wpływ różnych geometrii złączy pachwinowych na trwałość zmęczeniową stali S1100. Dla porównania wykonują analogiczne złącza w gatunku S355. Przyjęto 3 przypadki różniące się kształtem krawędzi. Pierwszy to standardowe prosta krawędź typowa dla złącza pachwinowego. W drugim przypadku krawędź miała kształt sinusoidalny, w trzecim przypadku krawędź była półkolista. Amplituda krzywych wynosiła 4 mm, a połowa ich długości 8 mm. Złącza wykonano na zrobotyzowanym stanowisku z energią liniową mieszczącą się w zakresie 1,00 kJ/mm do 1,28 kJ/mm. Próbki do badań zmęczeniowych poddano rozciąganiu z ściskaniem. W obu przypadkach, gdzie zmieniona kształt krawędzi spawanej blachy uzyskano wyższe trwałości zmęczeniowe aniżeli w przypadku standardowej prostej krawędzi. W zakresie CI (obejmuje zarówno zarodkowanie pęknięć, jak i wzrost małych pęknięć) największą różnicę widać przy zmniejszaniu naprężenia. Trwałość zmęczeniowa wyrażona liczbą cykli rośnie ponad dwukrotnie dla złączy „falistych”. Geometria pęknięcia była również różna dla każdego typu krawędzi. Próbka z płaską krawędzią po wzroście pęknięcia na głębokość 2 mm przyjęła eliptyczny kształt wzrostu pęknięcia. Próbki z „falistym” złączem wykazywały więcej punktów inicjacji pęknięć. Wraz z ich wzrostem występowało zjawisko łączenia z innymi uszkodzeniami. Geometryczne zmiany krawędzi przeznaczonej do spawania pozytywnie wpływają na trwałość zmęczeniową.

Moeller, Baumgartner i inni [75] analizowali niskocyklową trwałość zmęczeniową stali S1100, S960 w przy stałym amplitudowym i losowym obciążeniu. Analizie poddano złącza wykonane metodą 135/MAG/GMAW oraz po różnych obróbkach wykańczających. Porównywano trwałość w stanie po spawaniu, po szlifowaniu lica spoiny, po młotkowaniu wysokoczęstotliwościowym oraz po podtapianiu linii wtopienia metodą TIG. Rozważano również wpływ niezgodności wewnętrznych i zewnętrznych na trwałość.

Znajomość parametrów procesu spawania jest znacząca pod względem trwałości zmęczeniowej, wymagana jest skrupulatna dokumentacja i zgodność wykonania z instrukcją spawalniczą – WPS-em. Jakość spawania i kształt spoiny musi być powtarzalny dla osiągnięcia wysokiej liczby w zakresie LCF. W ocenie zmęczeniowej należy uwzględnić pozytywny wpływ parametrów procesu spawania i metod obróbki po spawaniu na wygląd spoiny, a także na VAL. Wykazano różnice w cyklicznych krzywych naprężenie-odkształcenie pomiędzy materiałem podstawowym, strefą wpływu ciepła i metalem spoiny. W ocenie zmęczenia opartej na odkształceniu należy rozważyć wpływ różnic mikrostrukturalnych na cykliczne zachowanie materiału. Wyniki należy ostatecznie przenieść na inne złącza spawane. Lokalne koncepcje projektowe są uzasadnione w przypadku oceny trwałości zmęczeniowej przy wyższych naprężeniach i odkształceniach, gdy uwzględnione są efekty podparcia karbu.

3.5. Problematyka związana z naprężeniem własnym.

Każdy proces produkcyjny generuje naprężenia, które są kumulowane w obrabianym materiale. Sam fakt występowania naprężeń wewnętrznych w materiale nie jest problematyczny. Dopiero w momencie występowania lokalnych obszarów o znacznym gradiencie tych naprężeń może powodować nieoczekiwane problemy. Stale o podwyższonych wytrzymałościach są materiałami o znacznej wrażliwości na termiczne procesy produkcyjne jak podgrzewanie, cięcie termiczne, spawanie czy obróbki po spawalnicze. Występuje szereg publikacji w których analizowano wpływ cięcia termicznego procesów spawalniczych, czy obróbek cieplnych wskutek symulacji pożarów [65], [76], [77].

3.6. Podsumowanie z przeglądu literatury

Reasumująca prezentowany przegląd literatury wyciągnięto następujące wnioski:

- Stale o podwyższonych wytrzymałościach są analizowane w większości przypadków do gatunku S960. Opublikowanych jest zdecydowanie mniej prac badawczych analizujących gatunki S1100 czy S1300;
- W literaturze przedmiotu występują opracowania badań złączy wykonanych metodami, które można zautomatyzować jak metoda MAG/135, TIG/141, Laser/521 bądź hybrydy tych metod;
- Niepublikowane są charakterystyki zmęczeniowe dla innych stanów obciążenia jak rozciąganie czy ściskanie;
- Dostępne normy i przepisy nie uwzględniają stali o granicach plastyczności przekraczających 700 MPa;
- W literaturze brak publikacji podejmujących temat badań zmęczeniowych złączy wykonanych metodą MMA/111;
- Charakterystyki zmęczeniowe dla złączy wykonanych w technologii spawania MMA/111 nie są dostępne.

4. Cel i zakres pracy

4.1. Cel pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy norm oraz publikacji naukowych sformułowano następujące cele:

Sprawdzenie trwałości zmęczeniowej dla stali wysokowytrzymałych – o granicy plastyczności przekraczającej 690 MPa, wykonanych przy różnych parametrach spawania;

Porównać wpływ parametrów i metod spawania na trwałość zmęczeniową;

Sprawdzić poziom naprężeń własnych wprowadzonych do materiału wskutek procesu spawania.

4.2. Zakres pracy

W ramach pracy prowadzono badania na materiałach zaliczanych do stali o podwyższonej wytrzymałości zawartych w normie PN EN 10025-6 i nie tylko. Najniższym gatunkiem analizowanym w pracy był S690 a najwyższym S1100. Poza standardowymi badaniami wytrzymałościowymi materiałów podstawowych przeprowadzono badania nieniszczące złączy spawanych, wytrzymałościowe i zmęczeniowe materiału bazowego i złączy, symulacje i pomiary naprężeń własnych a także analizy spektralne składu chemicznego i metalograficzne struktury.

5. Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych

Stale o podwyższonej wytrzymałości charakteryzują się wysokimi wartościami granicy plastyczności wraz z niską temperaturą przejścia w stan kruchy (do -60°C). Norma PN EN 10025-6 [36] nie narzuca producentom składu chemicznego dla konkretnych gatunków. Podane są w niej maksymalne zawartości danego pierwiastka a od producenta stali zależy jaki będzie skład produkowanego materiału.

W zależności od gatunku stosowane są odpowiednie procesy obróbek cieplnych w celu uzyskania pożądanych wytrzymałości. Podstawowe to termomechaniczne walcowanie oraz ulepszanie cieplne, gdzie w efekcie uzyskuje się niskostopową drobnoziarnistą stal o strukturze martenzytycznej.

Można przyjąć, że producenci stosują w swoich stalach zawartość węgla w górnym dopuszczalnym zakresie. Węgiel jest składnikiem koniecznym do wydzielenia się martenzytu. Zawartość chromu jest czynnikiem sprzyjającym wydzieleniu się węglików żelaza a także pierwiastkiem poprawiającym hartowność stali oraz odporności na wyższe temperatury. Mangan wpływa na zwiększenie twardości i wytrzymałości oraz poprawia odporność na ścieranie. Jednak zbyt duża zawartość węgla będzie powodowała wzrost równoważnika węgla i tym samym problemy przy spawaniu. Stąd realnie ogranicza się zawartość węgla do możliwie najniższych poziomów pozwalających na uzyskanie żądanej struktury.

Użyte stale spełniają kryteria stawiane przez normę PN EN 10025-6. Jest to punkt wyjściowy do dalszej analizy zmian bądź degradacji wskutek procesu produkcyjnego. Stale S890 i S960 mają tak zbliżone do siebie granice kryteriów wytrzymałościowych, że bardzo często są oferowane jako jeden gatunek S890/S960. Należy zauważyć, że stale o granicach wytrzymałości 1100 MPa oraz 1300 MPa nie są ujęte w aktualnie obowiązującym wydaniu normy. Zależnie od producenta można się spotkać z inną nazwą handlową tych gatunków. W Thyssen Krupp to XABO i NAXTRA, w SSAB to STRENX i oferują one stal o minimalnej granicy plastyczności do 1300 MPa, w Dillinger Huette oferowany jest Dillimax do minimalnej granicy plastyczności 1100 MPa. Na rynku występują również materiały innych producentów o podobnych wytrzymałościach jednak

te wymienione należą do najbardziej uznanych, których produkty cechują się bardzo dużą powtarzalnością.

W normie materiałowej są określone parametry wytrzymałościowe oraz skład chemiczny wymagane dla poszczególnych gatunków. Szczegółowe dane można odczytać z tabeli 6:

Tabela 6. Właściwości mechaniczne w temperaturze otoczenia dla stali w gatunkach S460 – S960 [36]

Oznaczenie		Minimalna granica plastyczności R_{eH} , MPa			Minimalna granica wytrzymałości R_m , MPa			Minimalne wydłużenie $L_0=5,65\sqrt{S_0}$
		Grubość nominalna			Grubość nominalna			
Według EN 10027-1	Według EN 10027-2	≥ 3 ≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150	≥ 3 ≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150	
S460Q	1.8908				550		500	17
S460QL	1.8906	460	440	400	-		-	
S460QL1	1.8916				720		670	
S500Q	1.8924				590		540	17
S500QL	1.8909	500	480	440	-		-	
S500QL1	1.8984				770		720	
S550Q	1.8904				640		590	16
S550QL	1.8926	550	530	490	-		-	
S550QL1	1.8986				820		770	
S620Q	1.8914				700		650	15
S620QL	1.8927	620	580	560	-		-	
S620QL1	1.8987				890		830	
S690Q	1.8931				770	760	710	14
S690QL	1.8928	690	650	630	-	-	-	
S690QL1	1.8988				940	930	900	
S890Q	1.8940				940	880		11
S890QL	1.8983	890	830	---	-	-	---	
S890QL1	1.8925				1100	1100		
S960Q	1.8941				980			10
S960QL	1.8933	960	---	---	-	---	---	
					1150			

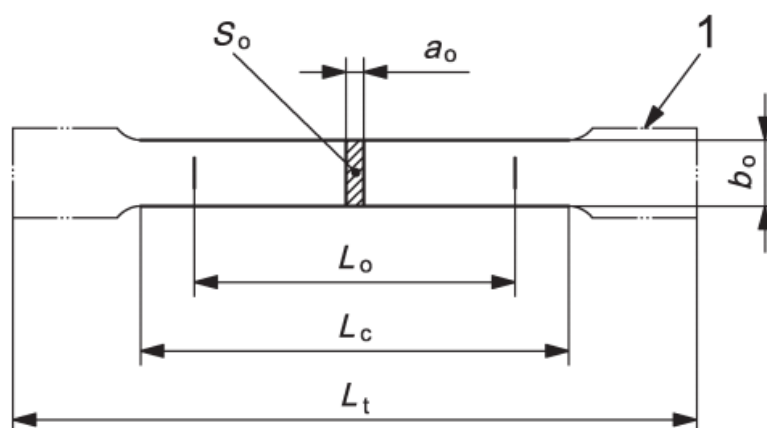
Dla materiałów nie zawartych w tabeli 6 wytyczne wytrzymałościowe zawarte w tabeli 7. Kryteria te bazują na kryteriach będących rozwinięciem typoszeregu niższych gatunków stali.

Tabela 7. Wytrzymałość stali S1100 i S1300 [78], [79]

Oznaczenie	W. Nr	Nazwa handlowa	R_{eH} MPa, min.	R_m MPa	A_5 % min.
S1100	1.8942	XABO1100	1100	1200 – 1500	8
S1300	1.8794	XABO1300	1300	1400 – 1700	8

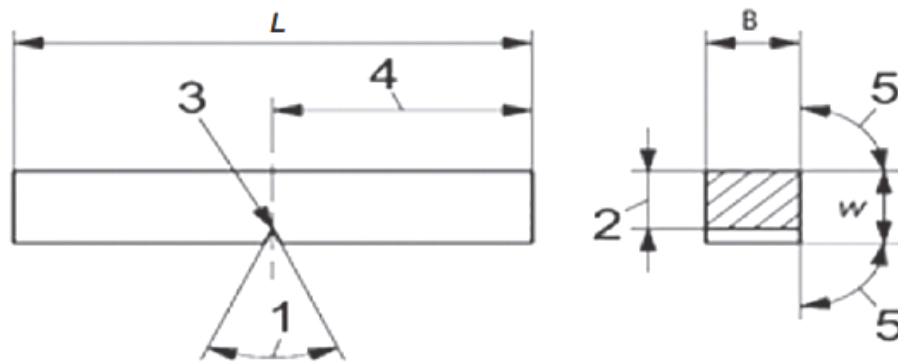
Użyte materiały spełniały wymogi stawiane przez normę materiałową lub wytyczne producenta. Zostały również sprawdzone i potwierdzone w badaniach własnych pod względem rozwarstwienia metodą ultradźwiękową i wytrzymałościowym.

Z racji niewystępowania gatunku S1100 w normie sprawdzone zostały parametry wytrzymałościowe w szerszym zakresie niż dla pozostałych gatunków. Wyniki wszystkich prób wytrzymałościowych materiałów bazowych zostały odniesione do wymagań normy przedmiotowej PN EN 10025-6 [36]. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w oparciu o normę PN EN ISO 6892-1 [80], na typowych próbkach o przekroju prostokątnym – rys. 27.



Rysunek 27. Kształt próbki o przekroju prostokątnym [80]

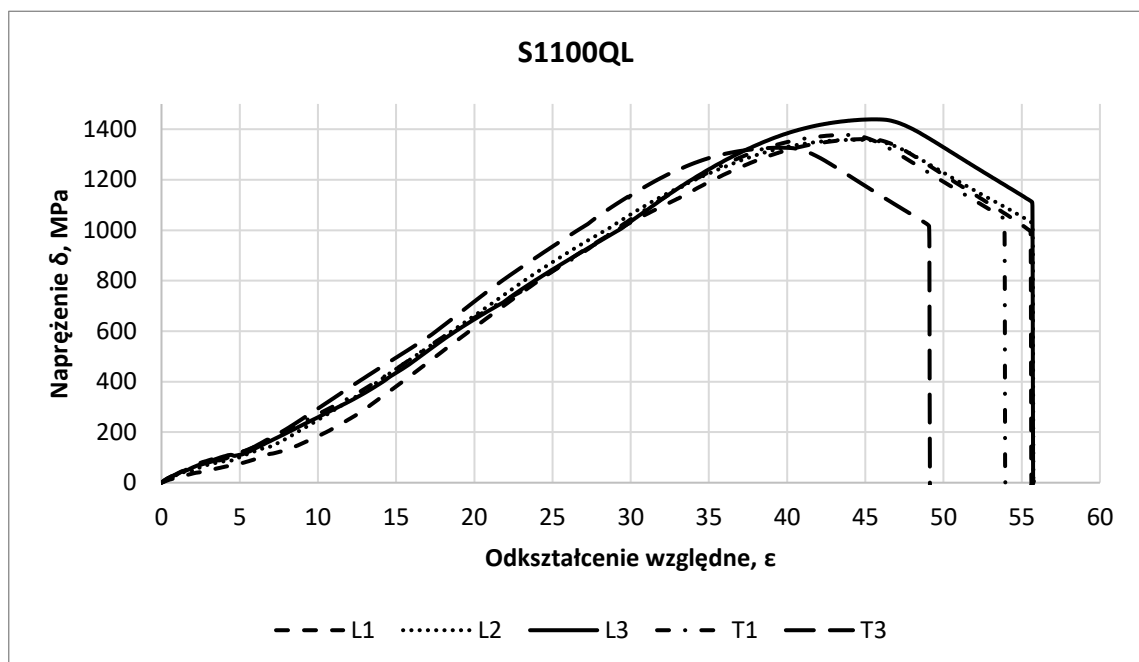
Próbki do badań zostały pobrane w 2 prostopadłych osiach względem kierunku walcowania. Wykresy z próby rozciągania przedstawione zostały na rysunku 29. Próba udarności została przeprowadzona w oparciu o normę PN EN ISO 148-1 [81] na próbkach Charpy V – rys. 28, pobranych w dwóch kierunkach względem kierunku walcowania.



Rysunek 28. Geometria próbki Charpy-V [21]

Przeprowadzona została również analiza składu chemicznego. Wyniki badań wytrzymałościowych stali S1100QL i składu chemicznego podano w tabeli 8.

Wyniki przedstawione na rysunku 29 zostały zebrane w tabeli 8 potwierdzają zgodność wytrzymałości materiału S1100 względem wytycznych gwarantowanych przez producenta. Badane próbki wykazały wręcz wyższe wytrzymałości niż było gwarantowane w atęcie dostarczonej do blachy.



Rysunek 29. Wykres rozciągania - próby własne

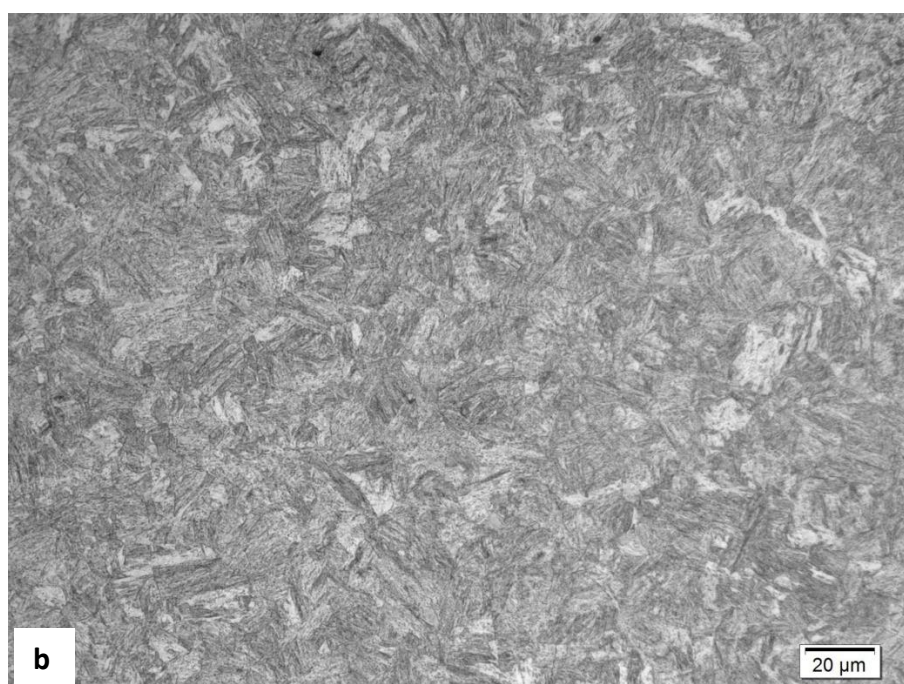
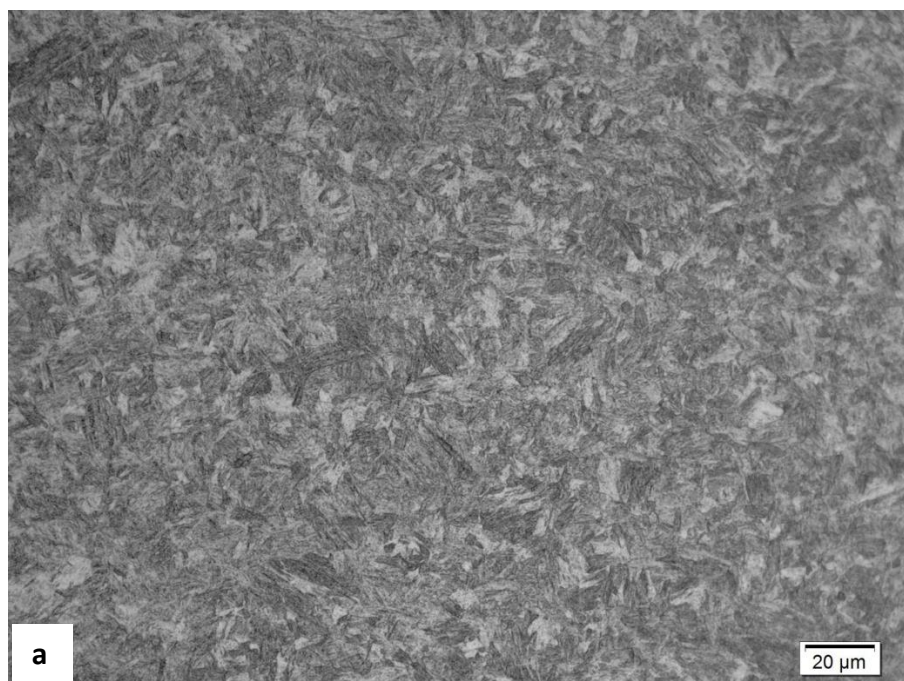
Tabela 8. Wyniki badań wytrzymałościowych gatunku S1100

	Kierunek	Re MPa min. 1100			Rm MPa 1200 - 1500			A min. 8%			KV J min. 30			KV J	Temp. °C
Wyniki atest	Q	1157			1384			10			30	37	31	33	-40
		1185			1386			9			41	35	31	36	
Badania własne	Q	1279			1397			12			78	88	71	80	-40
											96	101	74		
		1252	1236	1350	1377	1380	1433	11,8	12,6	12,0	76	53	87		
Badania własne	L	1225			1346			11			58	62	67	56	-40
											63	53	48		
		1200	1225	1250	1357	1357	1323	11,5	11,4	11,6	58	62	32		

Wyniki badań własnych sugerują dużą zgodność wyników otrzymanej blachy z wynikami uzyskanymi w atestie materiałowym przygotowanym przez producenta blachy. Dla uzyskania większej liczby danych badanie przeprowadzono na potrojonej liczbie próbek. Wyniki próby rozciągania w 2 kierunkach okazują dużą izotropię blachy. Zgodnie z wytycznymi normy PN EN 10025-1 [35] próbki do rozciągania powinny zostać pobrane prostopadłe do kierunku walcowania blachy. Jednak również próbki z kierunku równoległego nie odbiegają znacząco i spełniają minimalne wymagania określone przez wytwórcę. Mierzalna jest również różnica wydłużenia zależnie od kierunku pobrania próbek.

Z racji, że blacha została sprawdzona w laboratorium producenta w temperaturze -40°C schłodzono próbki do tego samej temperatury. Analogicznie do prób rozciągania w również udarności pobrano w dwóch prostopadłych względem siebie kierunkach. Wyniki dla próbek równoległych cechują się wyższą udarnością niż próbki poprzeczne. Zgodnie z wytycznymi normy [36] badanie należy przeprowadzić na próbkach poprzecznych.

Wykonano również badania metalograficzne struktury blachy. Struktura materiału rodzimego stali S1100QL składa się głównie z martenzytu odpuszczonego i bainitu – widoczne na rysunku 30 a i b.



Rysunek 30. Struktura krystalograficzna blachy w gatunku S1100

Analiza składu chemicznego przeprowadzona została metodą spektroskopii emisyjnej na spektrometrze Ametek Spektromaxx. Wyniki tej analizy zawarte są w tabeli 9.

Tabela 9. Skład chemiczny blachy S1100QL

	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	N, %	B, %	Cr, %
Norma	max. 0,22	max. 0,86	max. 1,80	max. 0,025	max. 0,012	max. 0,016	max. 0,006	max. 1,60
Atest	0,17	0,23	1,12	0,011	0,001	0,0031	0,025	0,67
Badania własne 1	0,11	0,24	1,14	0,015	0,003	0,014	0,003	0,66
Badania własne 2	0,14	0,24	1,14	0,013	0,002	0,013	0,002	0,66
	Cu, %	Mo, %	Nb, %	Ni, %	Ti, %	V, %	Zr, %	Al, %
Norma	max. 0,55	max. 0,74	max. 0,07	max. 2,10	max. 0,07	max. 0,14	max. 0,17	min. 0,01
Atest	0,050	0,62	0,030	0,600	0,005	0,000	0,000	0,092
Badania własne 1	0,052	0,62	0,031	0,051	0,003	0,004	0,002	0,089
Badania własne 2	0,052	0,61	0,031	0,051	0,003	0,003	0,002	0,089

W żadnym z pomiarów nie stwierdzono zawartości pierwiastków stopowych ponad dopuszczalne zawartości określone w PN EN 10025-6 [36]

Materiał wejściowy w gatunku S1100QL do przygotowania złączy spawanych cechował się parametrami wytrzymałościowymi i strukturalnymi spełniającymi wszystkie wymogi producenta.

6. Właściwości mechaniczne złączy spawanych

Spawane złącza ze stali bada się pod kątem prawidłowej technologii spawania w oparciu o normę PN EN ISO 15614-1 [17]. W niej są zawarte wytyczne określające kryteria, które muszą być spełnione dla uznania danego złącza jako zgodnego z wymaganiami. Wszystkie złącza wykonane poprzez spawanie poddaje się badaniom nieniszczącym w celu weryfikacji poprawności wykonania. W następnej kolejności są wykonywane badania niszczące. Co do zasady przyjmuje się, że materiały spawane muszą wykazywać co najmniej taką wytrzymałością jak materiał rodzimy wykorzystany do spawania złącza. Możliwe jest również określenie innym kryteriów, jeśli wcześniejszy warunek nie jest możliwy do spełnienia. Ma to zastosowanie dla stali w gatunkach S1100 i S1300 z uwagi na brak materiałów spawalniczych gwarantujących uzyskanie złącza o wytrzymałości równej lub wyższej w stosunku do materiału podstawowego. Podobnie jak z wytrzymałością wygląda sprawa z pracą łamania. Średnia z trzech próbek musi być co najmniej równa minimalnej wartości pracy łamania w danej temperaturze badania. Dopuszcza się jeden wynik do 30% poniżej minimalnej przy jednoczesnym zachowaniu średniej [17].

Wykonanych zostało łącznie 128 złączy próbnych z gatunków S690, S890, S960 oraz S1100. Częściowo były to złącza doczołowe i pachwinowe wykonane metodami 135 i 111 przy różnych energiach liniowych częściowo z podgrzewaniem, częściowo bez. Złączy doczołowych wykonanych metodą 135 było 30 a metodą 111 łącznie 14. Z tych złączy do badań wytrzymałościowych wytypowano wszystkie, mimo iż niektóre nie spełniły wymogów dla badań nieniszczących.

Złącza spawane wykonane są ściśle według przygotowanej instrukcji spawalniczej pWPS zawierającej informacje odnośnie do postępowania dla prawidłowego wykonania złącza spawanego. Skrót WPS wywodzi się z języka angielskiego od słów Welding Procedure Specification, czyli specyfikacja procesu spawania. Jednak zanim taka procedura zostanie zakwalifikowana jako właściwa przygotowuje się jej wstępną wersję pWPS. Przykładowy dokument przedstawiony na rysunku 31. Dokument ten zostaje sporządzony przez personel nadzoru spawalniczego przed przystąpieniem do wykonania złącza. Poza informacjami o gatunku i grubości blach do spawania, znajduje się tam

informacja odnośnie do samego złącza. Procedury przygotowania krawędzi i powierzchni do spawania. Metoda, którą należy je wykonać, pozycji spawania, gatunki materiałów dodatkowych i gazów, o ile są konieczne.

Na rys. 31 można zobaczyć przykładowy pWPS dla złącza przygotowanego z stali S1100. Z tego dokumentu można odczytać, że złącze jest wykonane z blach grubości 12 mm, spawanych metodą 111 (potocznie zwana elektrodą) w pozycji PA (potoczna nazwa „podolna”). Spoina będzie wielościegowa spawana dwoma rodzajami elektrod. Ścieg przetopowy został wykonany elektrodą typu E42 5 B 42 H5 (o nazwie handlowej FOX EV 50) do spawania stali drobnoziarnistych w gatunku S355J2/P355GH. Ściegi wypełniające wykonano z kolei elektrodami w gatunku E 89 4 Mn2Ni1CrMo B 4 2 H5 o handlowej nazwie Phoenix SH Ni 2 K 130. Blachy zostały podgrzane wstępnie do temperatury w zakresie 120 – 150°C. Wykonując ściegi przy zachowaniu założonych parametrów prądowych wprowadzi się do złącza między 0,18 a 0,59 kJ/ mm ciepła. Dane literaturowe jak i materiały informacyjne wytwórców stali sugerują by nie przekraczać wartości 1 kJ/ mm [82]–[85]. Przekroczenie tej granicznej wartości energii liniowej wprowadzonej do złącza może skutkować obniżeniem parametrów wytrzymałościowych złącza z uwagi na zwiększenie się czasu $t_{8/5}$ a tym samym zajściu zmian strukturalnych w materiale podstawowym.

Dostępne są publikacje analizujące pod względem wytrzymałościowym i zmęczeniowym złącza z stali o podwyższonych parametrach HSS i UHSS. Jednak najczęściej są to złącza wykonane metodami zautomatyzowanymi jak 135/MAG/GMAW, 141/TIG/GTAW, metody hybrydowe MAG/Laser [3], [47], [58], [86]–[89]. Nie spotkałem się z publikacjami analizującymi złącza wykonane metodą 111/MMA/elektroda.

6.1. Badania NDT - nieniszczące

Wszystkie złącza doczołowe zostały poddane badaniom nieniszczącym. Wykonano badanie radiograficzne i ultradźwiękowe. Część z złączy na tym etapie wykazywały na tyle duże ilości niezgodności wewnętrznych, że można było przypuszczać, iż uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych mogą nie spełniać minimalnych wymagań stawianych temu materiałowi. Część płyt nie kwalifikowała się do dalszych badań z uwagi na niezgodności spawalnicze po badaniach NDT. Najczęściej występującymi nie-

zgodnościami były wtrącenia – najprawdopodobniej żużel, typowe dla metody 111, pęcherze gazowe – to bardzo częsta niezgodność przy spawaniu metodą 135. Często występującymi niezgodnościami były również przyklejenia między ściegowe. Niezgodności oraz klasy jakości klasyfikowano według PN EN ISO 5817 [18].

6.2. Badania DT – niszczące

Próby rozciągania poprzecznego na standardowych próbkach o przekroju prostokątnych wykonano w oparciu o normę PN EN ISO 4136 [19].

Próby udarności przeprowadzono na standardowych próbkach typu Charpy V zgodnych z PN EN ISO 148-1 [21], jednak sposób pobrania spełniał wymogi PN EN 22]. Wyniki w większości przypadków spełniały wymagania przy zadanej temperaturze badania przyjętej - 40°C.

Próby gięcia bocznego przygotowano według PN EN ISO 5173 [20], a średnicę trzpienia gnącego obliczono z wzoru zawartego w tejże normie. Dla materiałów o normatywnym wydłużeniu poniżej $A < 20\%$ należy wyliczyć średnicę trzpienia z wzoru:

$$d = \frac{100 \times t_s}{A} - t_s, \quad (7)$$

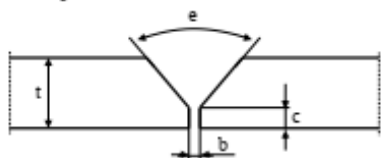
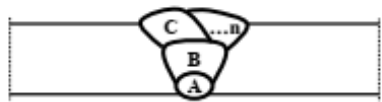

gdzie:

d – średnica trzpienia, mm,

t_s – nominalna grubość, mm,

A – nominalne, minimalne wydłużenie, %.

Dla gatunków o podwyższonych granicach wytrzymałości byłoby to odpowiednio nie więcej niż 61 mm dla S690, 81 mm dla S890, 90 mm dla S960 i maksymalnie 115 mm dla S1100. Przyjęte jest, że można zastrzyć warunki badania zmniejszając średnicę trzpienia gnącego.

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS) Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS)								
Wytwórca Manufacturer	SPÓŁKA AS Bartłomiej Werakso, Andrzej Nakoneczny 45-641 Opolo ul. Złota 18-1		pWPS nr: 111/BW/3.2-3.2/12/005 pWPS no:	Proces spawania wg EN ISO 4063: 111 Welding process according EN ISO 4063:				
			WPQR nr: --- WPQR no:	Rodzaj złącza: BW; ml Joint type:				
Numer: No.	Oznaczenie materiału podstawowego: Parent material (S)	Nr grupy wg ISO / TR 15608: ISO / TR 15608 group no.		Sposób przygotowania i czyszczenia złącza: Method of preparation and cleaning				
1.	S1100QL	3.2		Cięcie gazowe, plazmowe; Śrutowanie; Szlifowanie Gas cutting; Shoot blasting; Grinding				
2.	S1100QL	3.2						
Zakres grubości (mm): Material thickness t = 12,0 mm		Zakres średnic (mm): Material diameter d = --- mm		Pozycja spawania dla spoin czolowych / pachwinowych wg EN ISO 6947: Welding position for butt weld / fillet weld according to EN ISO 6947: PA				
Wymiary: Dimensions: t = 12 mm; b = 2 + 3 mm; c = 0 + 1 mm; e = 50°±5.	Rysunek złącza: Joint design			Kolejność spawania: Welding sequences				
								
Szczegóły dotyczące spawania: Welding details								
	Ściegi Layers	Proces spawania Process	Wymiar spoiwa Size [mm]	Prąd Current [A]	Napięcie Voltage [V]	Rodzaj prądu/ biegunowość Current type/ polarity	Prędkość spawania Travel speed [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła Heat input [kJ/mm]
PA	A B,C...n	111	2,5 3,2	60 - 80 80 - 100	22 - 23 23 - 24	DC / (+)	15 - 30 30 - 50	0,21 - 0,59 0,18 - 0,38
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materiał dodatkowy do spawania / topnik spawalniczy: Filler material / welding flux				Instrukcje dotyczące suszenia: Drying instruction				
Oznaczenie wg EN ISO 16834 Designation according EN ISO 16834		Nazwa handlowa Trade name	Producent Producer	Czas [h] Time		Temperatura [°C] Temperature		
E 42 5 B 42 H5 (1 ścieg / 1st layer) E 83 4 Mn2Ni1CrMo B 4 2 H5		FOX EV 50 Phoenix SH NI 2 K 130	Bohler Bohler	2 2		350 350		
Rodzaj gazu wg PN-EN ISO 14175: Gas flux according PN-EN ISO 14175				Min. temp. podgrzewania wstępnego: Preheat temp. min.		120+150 °C		
Ostonowy: Shielding	---	Ostonowy: Shielding	---	Max. temp. międzycięgowa: Interpass temp. max.		150 °C		
Formujący: Backing	---	Formujący: Backing	---	Wyrzwanie po spawaniu: Postweld soaking		180+200 °C Przez 4h / For 4h		
Dalsze informacje: Other information		Ścieg prosty String bead		Obróbka cieplna po spawaniu: Heat treatment		---		
Sposób przenoszenia materiału: Mode of metal transfer		---		Temp. wygrzewania: PWHt temp. range		---		
Warunki dodatkowe: Additional terms		Nie przerywać spawania aż do zakończenia złącza Don't interrupt welding until the end of the joint Zastosować kocmatę termiczną w celu spowolnienia stygnięcia podczas spawania Use a thermal blanket/mate to slow the cool down during welding Szlifować po każdym ściegu Grinding after each stitch		Czas wygrzewania: Holding time		---		
Wielkość otw. wylot. dyszy: Gas cup size		---		Szybkość nagrzewania: Heating rate		---		
				Szybkość chłodzenia: Cooling rate		---		
19.01.2018 DATE:				Utworzył CREATED  mgr inż. Dariusz Masłoń				
<small>Wydział Inżynierii i Techniki, Wydział Inżynierii i Techniki</small>				<small>Bez planowanej zmiany lub odwołania raportu nie może być ponownie stosowany w celu</small>				
<small>THE FIRST RELEASE IS SUBJECT OF THE PROJECT STATUS</small>				<small>REPORT MAY NOT BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THE APPROVING ORGANIZATION</small>				

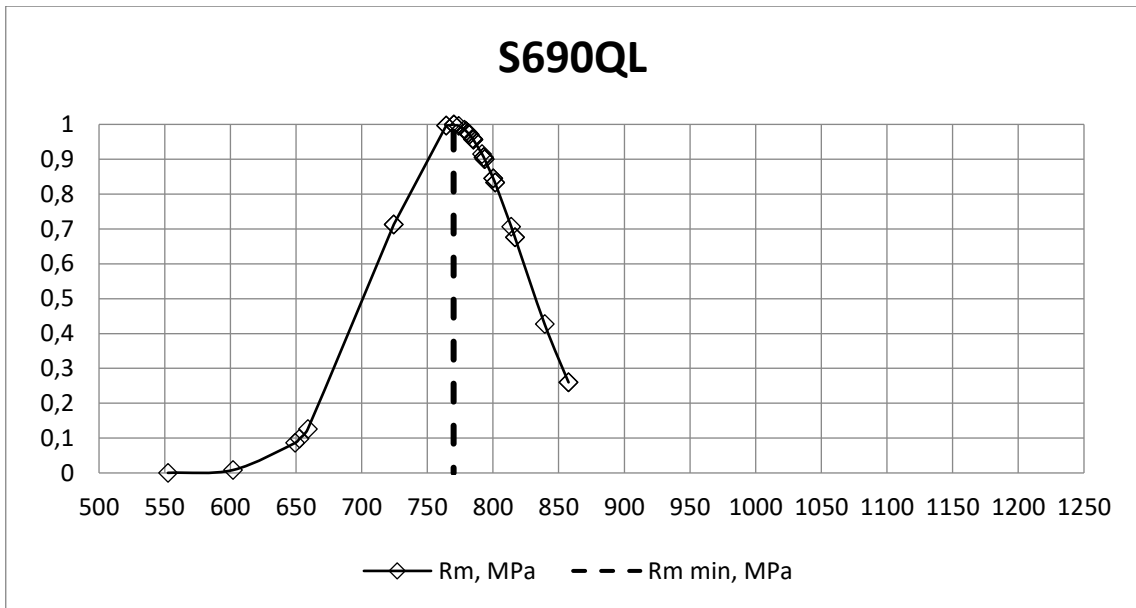
Rysunek 31. Przykładowy pWPS dla złącza z stali S1100QL

6.3. Wyniki badań wytrzymałościowych spoin

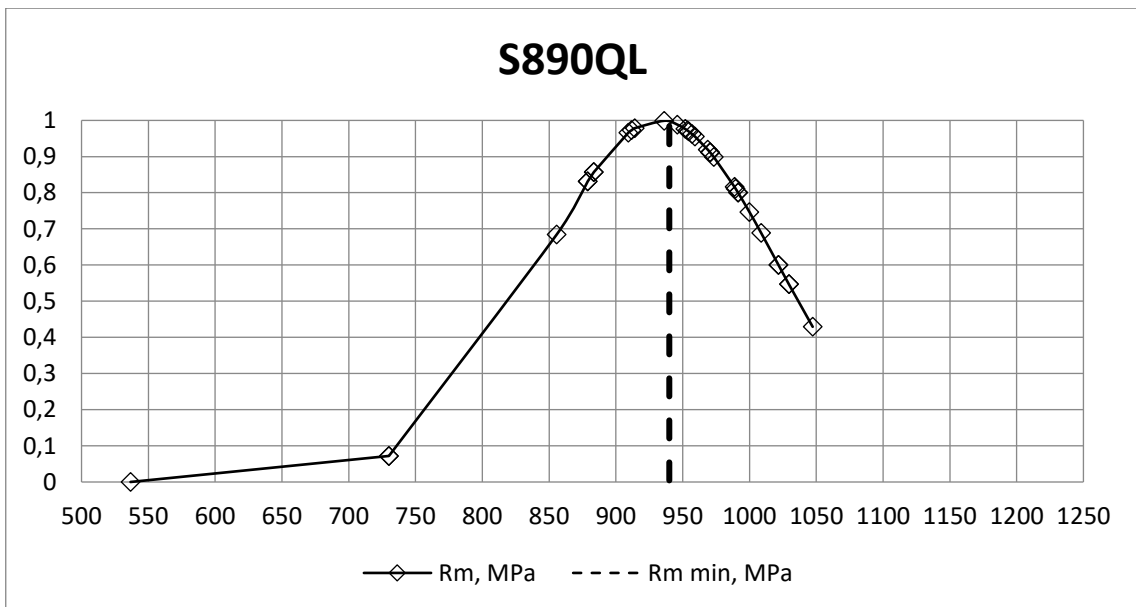
Z spawanych płyt większość została przebadana wytrzymałościowo pod kątem wytrzymałości na rozciąganie, udarowości czy próby gięcia. Z uzyskanych wyników rozciągania sporządzono rozkłady normalne dla lepszego przedstawienia wytrzymałości.

Z uwagi na małą liczbę danych nie było możliwe wyznaczenie pełnej krzywej Gaussa. Najliczniejszą grupą wyników były te z stali S960 – rysunek 34 oraz S690 – rysunek 32. Najślabiej reprezentowana była stal S1100 – rysunek 35. Na każdym z wykresów zaznaczono linią przerywaną minimalną wartość granicy wytrzymałości. Najwyższy odsetek powyższych wyników uzyskano z złączy z stali S690 – rysunek 32, bo aż 76%. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wyniosła 769 MPa a mediana wyników 782 MPa. Wyniki z stali S890 – rysunek 33, były w 64% pozytywne, wartość średnia wyniosła 933 MPa i była niższa niż minimalna wynosząca 940 MPa. Mediana wyników wynosiła 957 MPa. Niestety wśród najliczniejszej grupy wyników rozciągania próbek z stali S960 – rysunek 34, uzyskano tylko 4% pozytywnych wyników, gdzie wartość średnia wynosząca 930 MPa i mediana wynosząca 944 MPa były znacznie poniżej minimalnej wytrzymałości wynoszącej 980 MPa. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie były niższe niż wymagane dla stali S960, jednak ponad połowa spełniłaby wymogi dla stali S890. Złącza z stali S1100 cechowały się średnią wytrzymałością na poziomie 985 MPa i medianą 991 MPa. Minimalna wytrzymałość tej stali wynosi 1200 MPa i wartość ta nie została uzyskana w żadnej z przeprowadzonych prób.

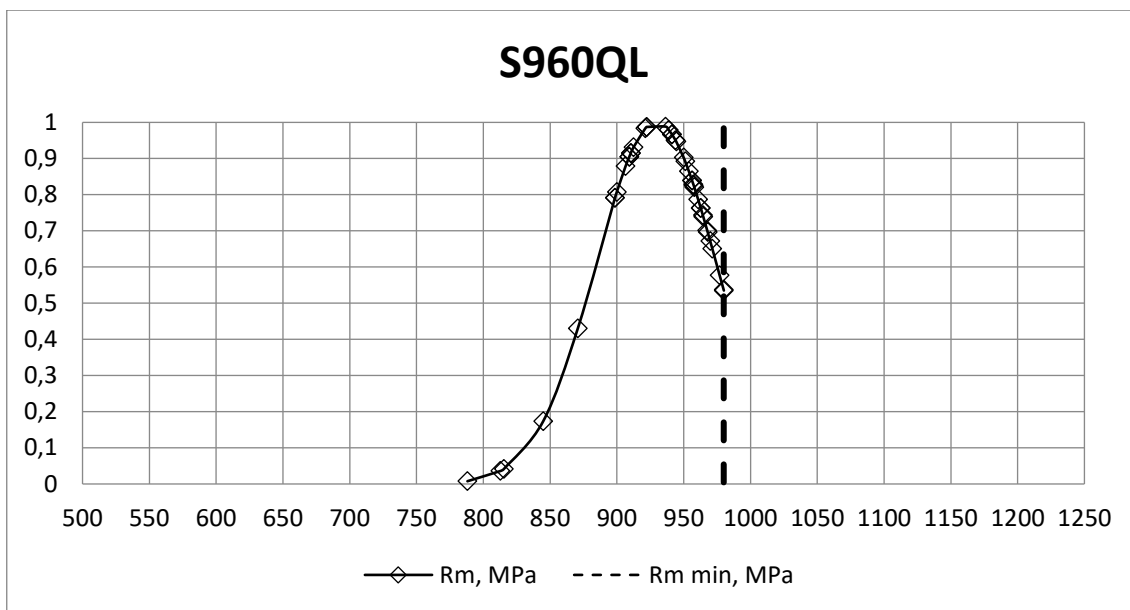
Wpływ na wyniki rozciągania miały w głównej mierze parametry spawania i użyte materiały dodatkowe do spania. Nie bez znaczenia była jakość samego złącza. Część próbek uległa zerwaniu w złączu. Na przełomie można było obserwować niezgodności wykazane na badaniach objętościowych. W przypadku gatunku S1100QL niskie wyniki wytrzymałości były spowodowane materiałem dodatkowym nie spełniającym wymogów wytrzymałościowych. Gatunek Union X 96 wytwórcy Voestalpine Boehler Welding [90] jest właściwy dla gatunku do S960 i ma gwarantowaną minimalną wytrzymałość na rozciąganie 980 MPa.



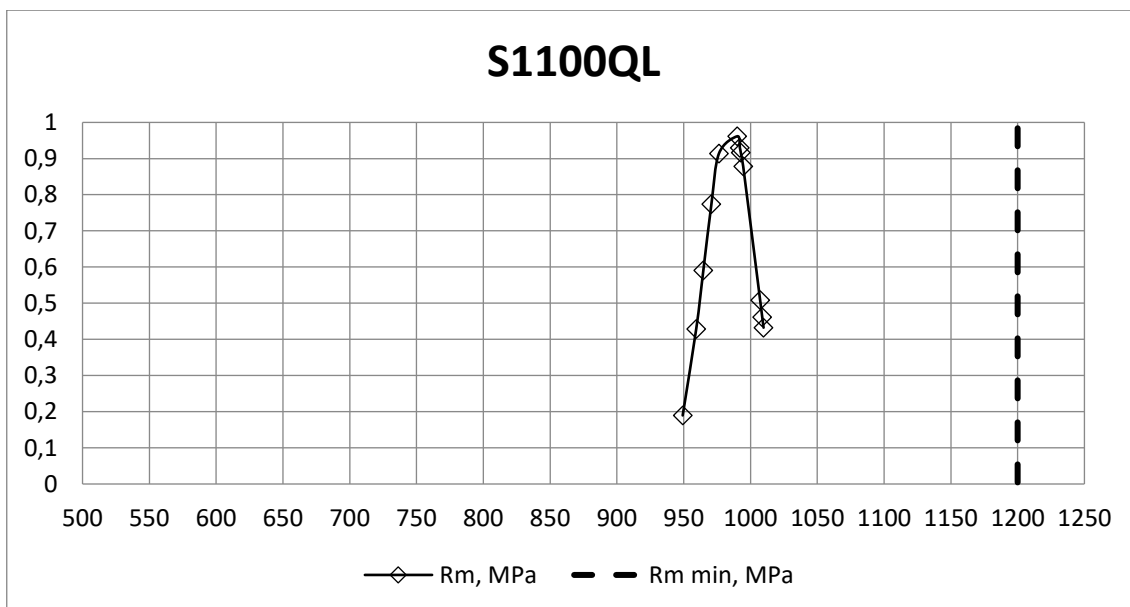
Rysunek 32. Rozkład Gaussa dla wyników z stali S690



Rysunek 33. Rozkład Gaussa dla wyników z stali S890



Rysunek 34. Rozkład Gaussa dla wyników z stali S960



Rysunek 35. Rozkład Gaussa dla wyników z stali S1100

Wyniki próby udarowości również zostały ujęte w formie rozkładu normalnego. W ponad 90% przypadków wynik badań udarowości z spoiny spełniły wymagania minimalnej udarowości dla materiału podstawowego wynoszącego 30J w temperaturze badania wynoszącej - 40°C. Z kolei wyniki udarowości z strefy wpływu ciepła w 49% przypadków można uznać za pozytywne.

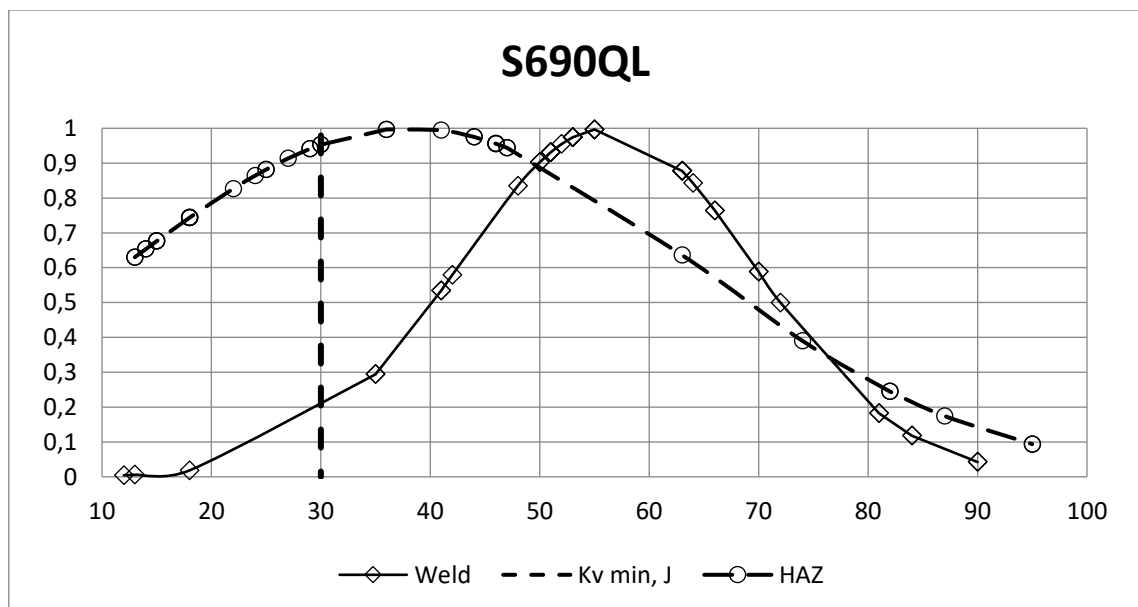
Wyniki udarowości dla stali w gatunku S690QL zostały przedstawione na rysunku 36. Wartość średnia wyników udarowości z spoiny wynosi 56J z medianą równą 53J a

odsetek pozytywnych wyników 92%. Wyniki udarności w strefie wpływu ciepła były niższe z wartością średnią wynoszącą 38J a mediana wyników wynosiła 30J. Pozytywnych wyników było 49%.

W przypadku wyników z złączy z stali S890 średnia wartość udarności w spoinie wyniosła 39J a mediana 38J. Wszystkie wyniki prób uzyskane z spoiny były pozytywne. W SWC wartość średnia udarności wynosiła 33J a mediana 31J, pozytywnych było 63% wyników. Wyniki przedstawiono na rysunku 37.

Wszystkie próbki udarności z spoiny wykonane z złącza stali S960 są pozytywne, wartość średnia wyniosła 47J a mediana 44. W przypadku próbek z SWC 81% było pozytywnych z wartością średnią równą 55J. Mediana wynosi 52J. Wyniki przedstawione na rysunku 38.

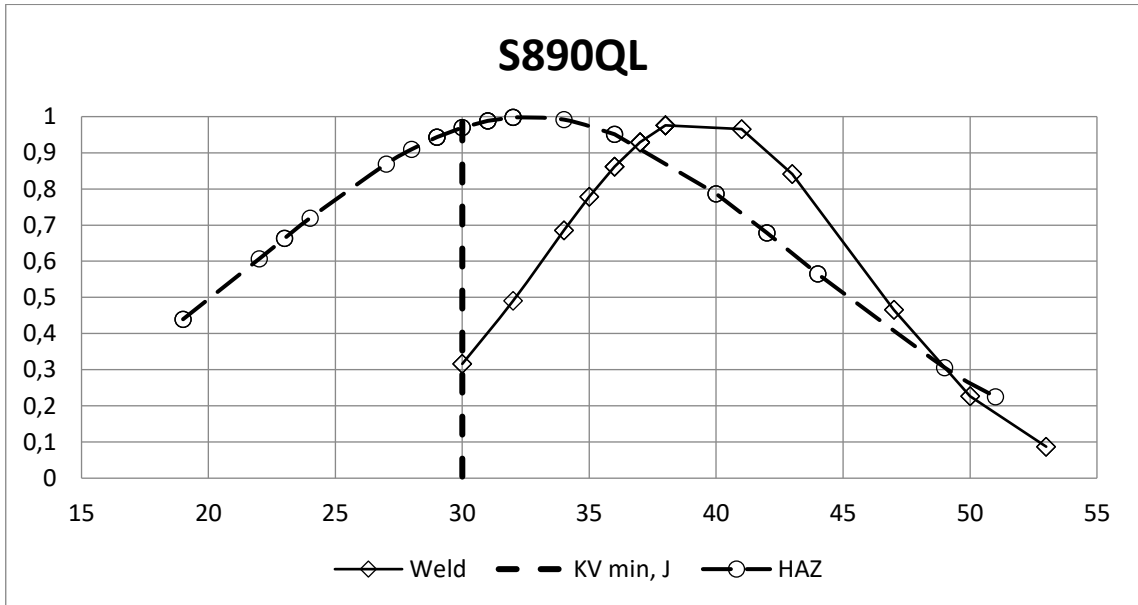
Podobnie jak z próbą rozciągania również udarności było najmniej wykonanych z złączy z stali S1100QL. Wyniki przedstawione na rysunku 39. Wszystkie próbki z SWC były pozytywne z średnią wartością równą 46J i medianą wynoszącą 47J. Wyniki próbek z spoiny były niższe. Średnia wartość wynosi 36J a mediana 43J, 93% wyników przekraczało minimalną wartość.



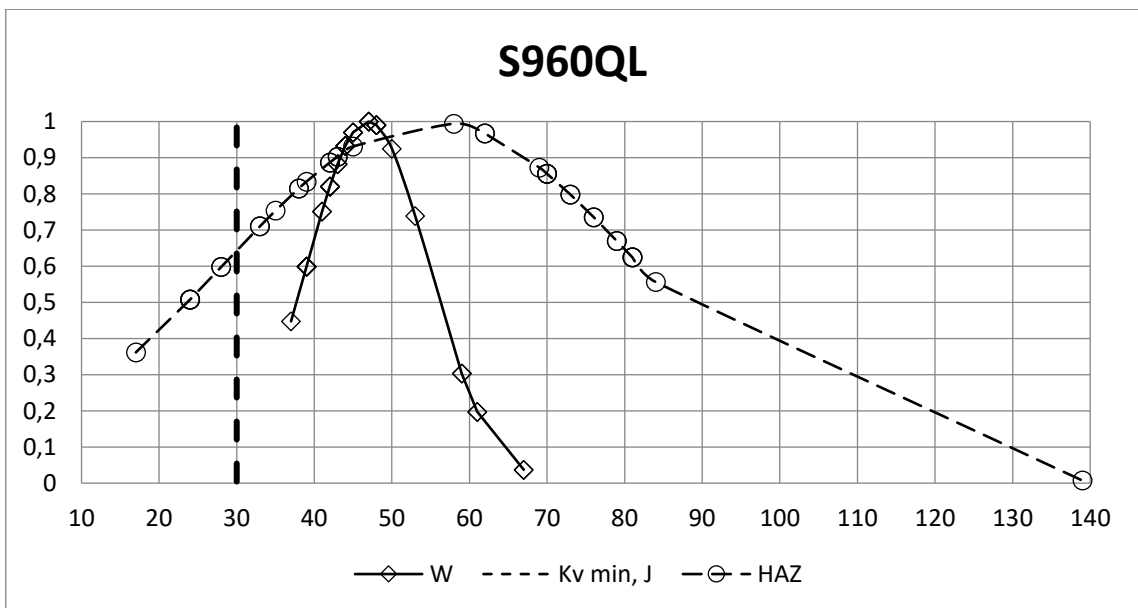
Rysunek 36. Wyniki udarności złączy z stali S690QL

Wyniki próby udarności wypadły lepiej niż próby rozciągania. Może to być spowodowane poziomem niezgodności wewnętrznych złączy. Z racji mniejszego przekroju próbki na udarność mniejsze było prawdopodobieństwo trafienia na niezgodność skut-

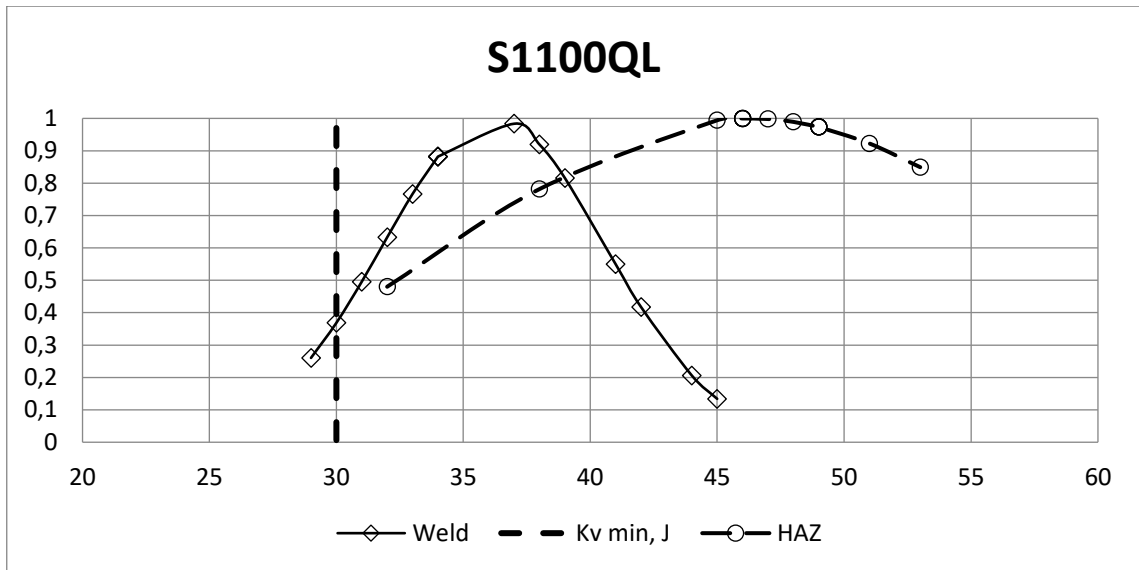
kującą znacznym spadkiem udarności. Zbyt mało wyników uzyskano dla dokładnego przedstawienia prawdopodobieństwa uzyskania pozytywnego wyniku.



Rysunek 37. Wyniki udarności złączy z stali S890QL



Rysunek 38. Wyniki udarności złączy z stali S960QL

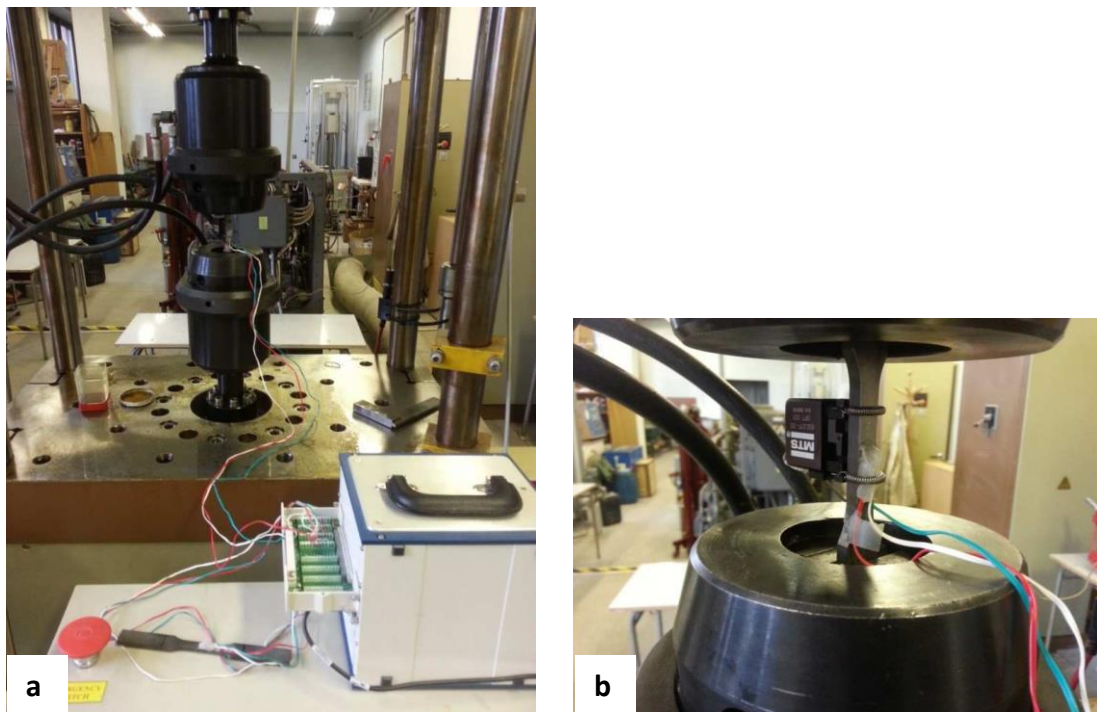


Rysunek 39. Wyniki udarności złączy z stali S1100QL

7. Badania zmęczeniowe

7.1. Stanowisko badawcze

Testy cyklicznego i losowego rozciągania-ściskania wykonano przy pomocy hydraulicznej maszyny do badań zmęczeniowych SHM 250. Stanowisko wyposażone jest we wbudowane czujniki siły i przemieszczenia. Do pomiaru odkształceń wykorzystywano ekstensometr mocowany na próbce. Urządzenie jest sterowane poprzez oprogramowanie napisane w systemie Matlab/Simulink. Stanowisko pomiarowe zaprezentowano na rys. 40



Rysunek 40 SHM250 [91]

We wszystkich przeprowadzonych testach zmęczeniowych zastosowano sterowanie siłą. Sinusoidalne wymuszenie $F(t)$ generowano zgodnie z zależnością:

$$F(t) = F_a \sin(2\pi ft),$$

(8)

gdzie:

F_a – amplituda wymuszenia, mm,

f – częstotliwość, Hz,

t – czas, s.

Natomiast jego częstotliwość zawierała się w przedziale od 2 do 24Hz. Badania prowadzono do momentu zwiększenia amplitudy przemieszczenia o 40%.

7.2. Wyniki badań eksperymentalnych

7.2.1. Wyniki badań zmęczeniowych materiału bazowego S1100QL.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania zmęczeniowe dla materiału bazowego w gatunku S1100QL. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 10.

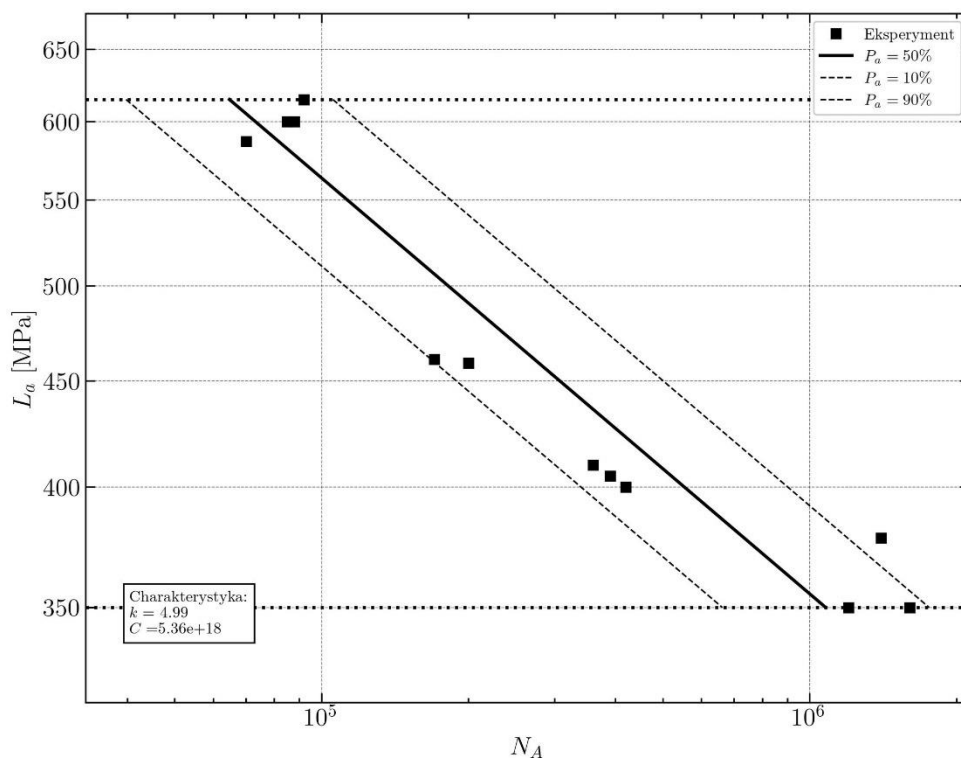
Tabela 10 Wyniki badania zmęczeniowego materiału podstawowego S1100QL – badania cykliczne

Lp.	Materiał podstawowy S1100QL	
	σ_a , MPa	N_f
1	587	70000
2	459	200000
3	400	420000
4	410	360000
5	378	1400000
6	461	170000
7	600	85000
8	350	1200000
9	405	390000
10	615	92000
11	600	88000
12	350	1600000

Na tej podstawie wyznaczono trwałość zmęczeniową zaprezentowaną na rysunku 41. Wyznaczono parametry modelu referencyjnego dla złączy spawanych i otrzymano charakterystykę zmęczeniową zgodną z wzorem:

$$N = (5,36 \times 10^{18}) \sigma_a^{-4,9},$$

(9)



Rysunek 41 Charakterystyka zmęzeniowa stali S1100QL

7.2.2. Wyniki badań zmęzeniowych połączenia spawanego.

Z płyt przeznaczonych do badania zmęzeniowego wykonano próbki to badań o przekroju prostokątnym i nominalnym wymiarze 8 x 12 mm. Szczegółową geometrię zaprezentowano na rys. 41.

Do badań zmęzeniowych wytypowane zostały złącza wykonane z stali S1100 i spawane metodą 111/ MMA z uwagi na brak dostępnej literatury. Płyty zostały wyspawane z wysoką energią liniową (tzw. „wysokie parametry”) oraz z niską energią liniową (tzw. „niskie parametry”). Z każdej płyty w przygotowano 22 próbki. Test przeprowadzono przy obciążeniu cyklicznym i losowym. Badanie prowadzono do momentu zwiększenia się przemieszczenia o 40% wartości początkowej. Ponadto przeprowadzono badania zmęzeniowe z losowym obciążeniem według rozkładu gęstości widmowej mocy przedstawionej na rys.45 które odpowiada wielu potencjalnym zastosowaniom stali konstrukcyjnych.

Wykres Basquina przedstawiający wyniki uzyskane z badania zmęzeniowego przedstawiono na rysunku 42. Na jego podstawie można zauważyć, że znaczący jest

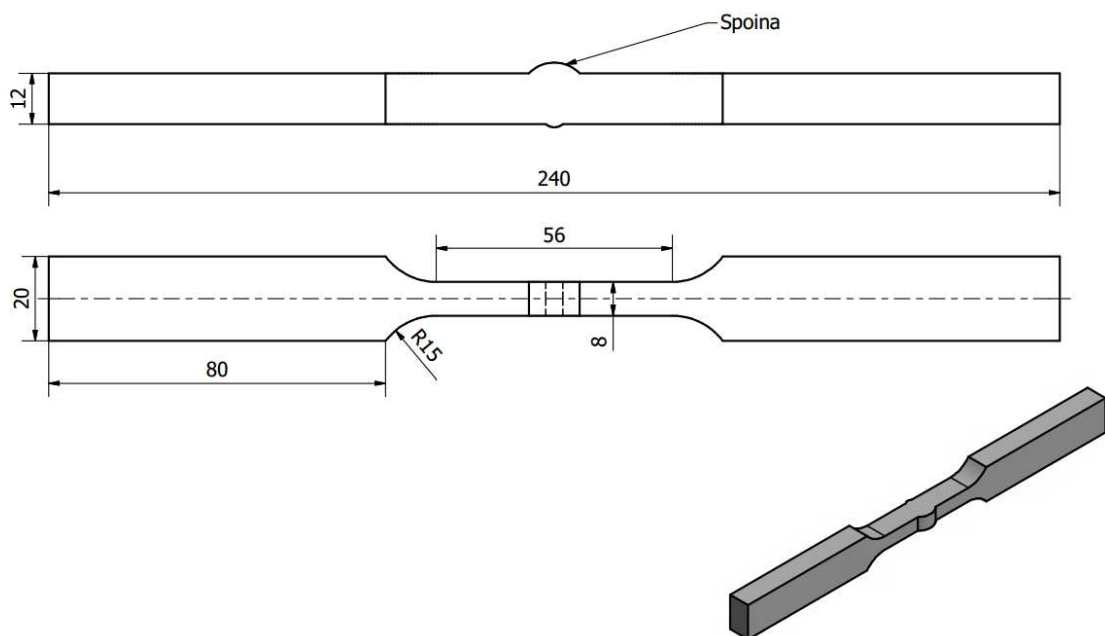
wpływ energii liniowej na trwałość zmęczeniową złącza. Krzywe charakterystyki zmęczeniowej wyrażone zostały wzorami 10 i 11.

Wzór krzywej charakterystyki zmęczeniowa dla „wysokiej” energii

$$N = (9,13 \times 10^{10}) \sigma_a^{-2,8}, \quad (10)$$

Wzór krzywej charakterystyki zmęczeniowa dla „niskiej” energii

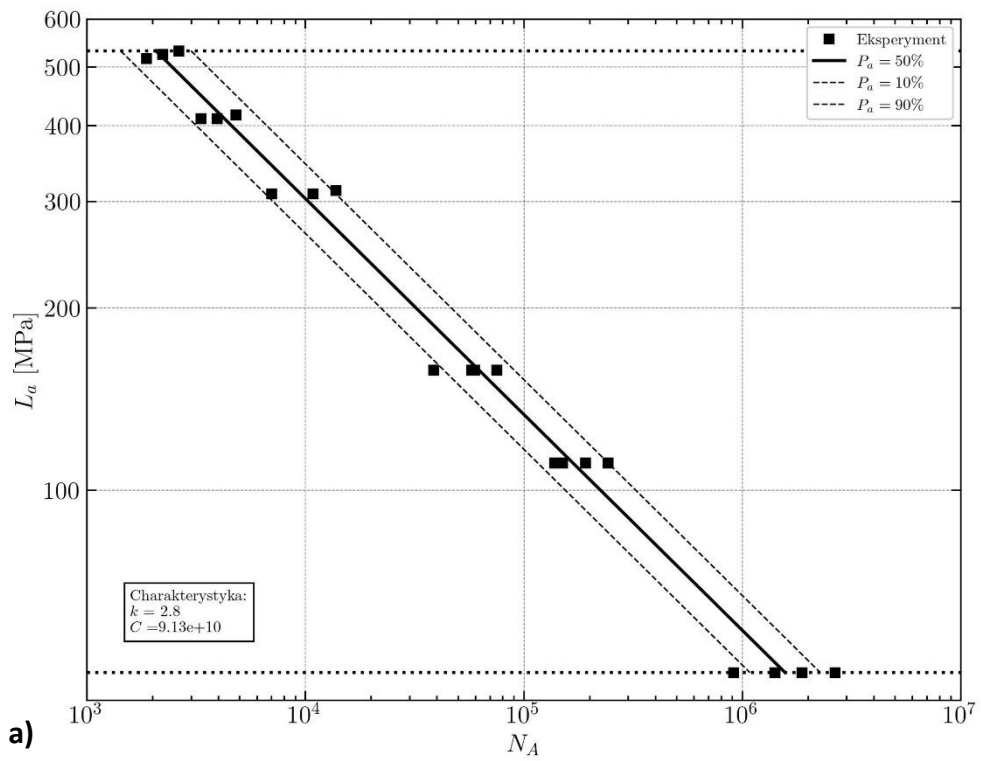
$$N = (4,11 \times 10^{11}) \sigma_a^{-3,03}, \quad (11)$$



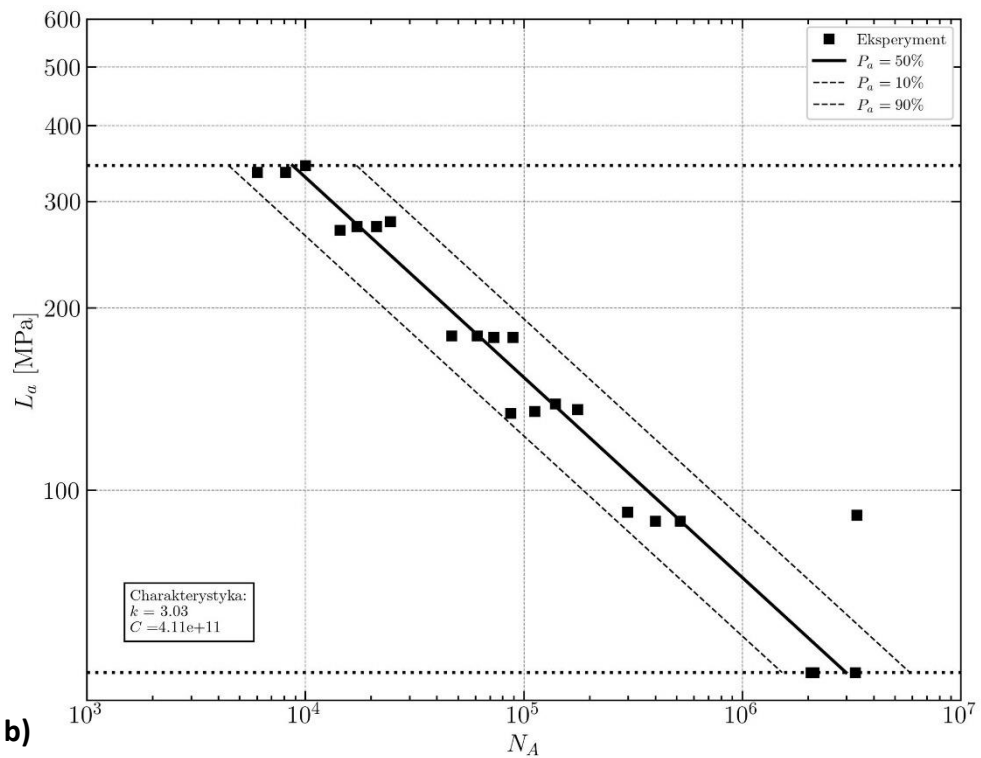
Rysunek 42. Kształt i wymiar próbki do badań zmęczeniowych

Tabela 11. Wyniki badań zmęczeniowych – obciążenia cykliczne

Złącza spawane S1100QL – spawane metodą 111				
	Wysokie parametry		Niskie parametry	
	$\bar{\sigma}_a$, MPa	N_f	$\bar{\sigma}_a$, MPa	N_f
1	517	1872	278	24461
2	417	4800	139	138886
3	309	10800	273	17183
4	309	7000	273	21126
5	158	59443	134	86795
6	158	38600	135	111857
7	158	57500	179	72587
8	111	150222	180	46667
9	111	241840	89	398836
10	111	137800	92	297979
11	50	1867561	91	3332079
12	50	910635	180	61021
13	532	2626	335	6008
14	525	2216	335	8087
15	411	3930	344	10000
16	411	3316	269	14344
17	313	13748	179	88983
18	158	75088	136	175484
19	111	191031	89	517947
20	50	1404317	50	2124805
21	50	2654380	50	3281927
22	---	---	50	2057614



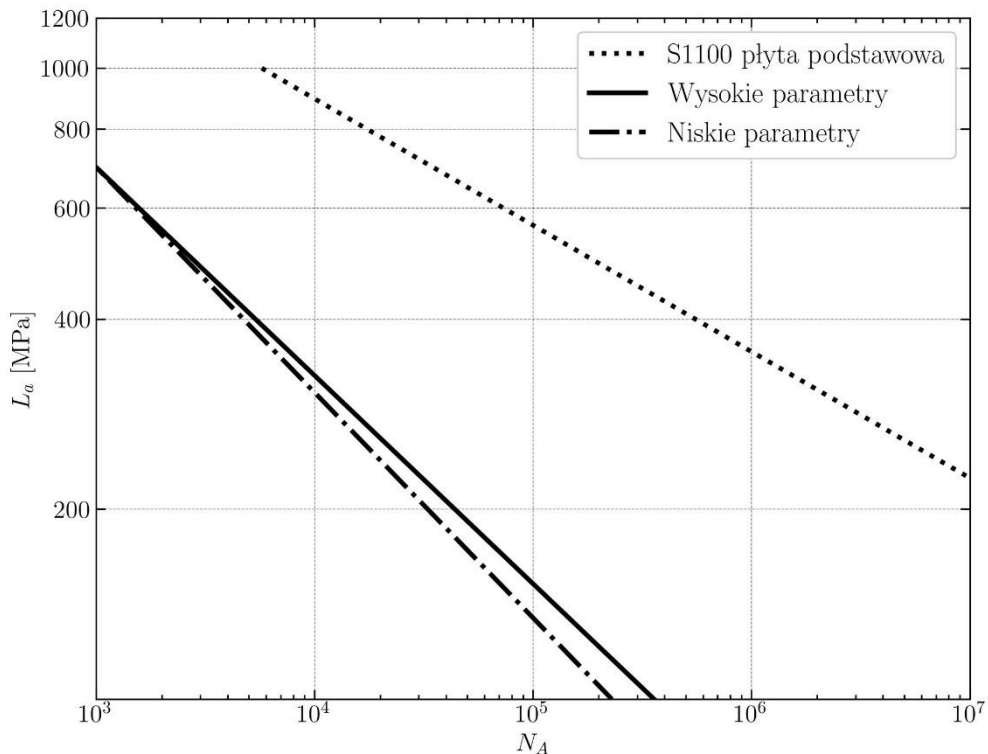
a)



b)

Rysunek 43. Wyniki badań zmęczeniowych cyklicznych w formie charakterystyk zmęczeniowych: a) charakterystyka dla „wysokich” parametrów spawania, b) charakterystyka dla „niskich” parametrów spawania,

Wyniki badań zmęczeniowych spoin zestawiono – rysunek 44, z trwałością materiału podstawowego z stali S1100 QL.



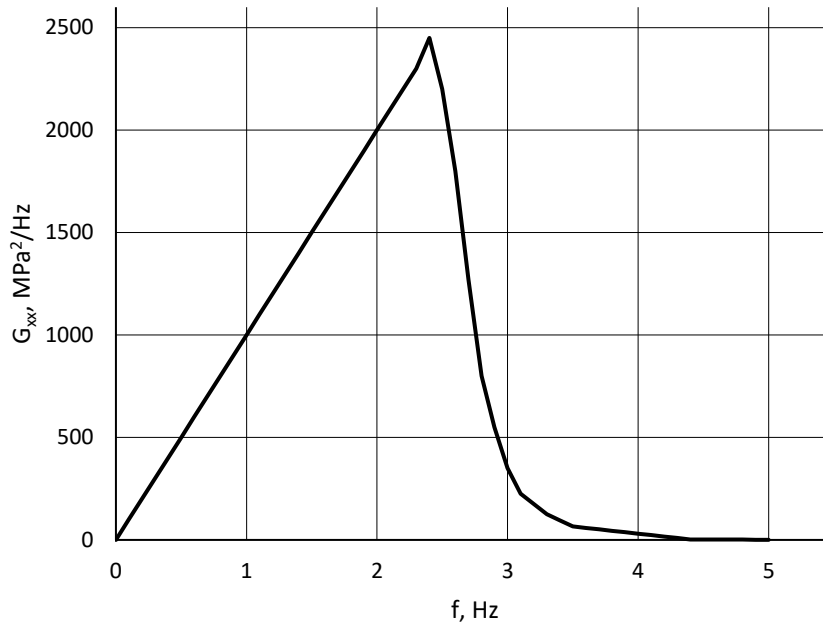
Rysunek 44 Porównanie trwałości zmęczeniowej materiału podstawowego i złączy wykonanych z stali S1100QL

Widoczne jest znaczne pogorszenie trwałości spoin w odniesieniu do trwałości materiału bazowego. Trwałość zmęczeniowa materiału podstawowego jest przy naprężeniu równym $\bar{\sigma} = 400$ MPa o ok. 2 rzędy wyższa aniżeli dla połączeń spawanych. Z kolei przy liczbie cykli równej $N=10^5$ maksymalne naprężenie dla materiału podstawowego, wynoszącym ok. $\bar{\sigma} = 600$ MPa jest ponad 3 krotnie wyższe aniżeli dla połączeń spawanych – wynoszącym poniżej 200 MPa.

Analizując normy przedmiotowe jak również prace naukowe - praca Bathiasa i Pineau [92], procedurę badania zmęczenia można podzielić na te niższego i wyższego rzędu. Ich kształt może nawiązywać poniekąd do kształtu piramidy potrzeb Masłowa. Badania cykliczne pełnią w takiej piramidzie rolę podstawy, natomiast o poziom wyżej znajdują się badania stochastyczne, które pozwalają często odtworzyć rzeczywiste warunki obciążeń. Jedyną w pełni losową metodą generowania obciążenia jest procedura opierająca się o wykorzystanie gęstości widmowej mocy obciążenia. Wygenerowany w ten sposób sygnał losowy zachowuje rozkład Gaussa amplitud obciążenia i często pozwala na wykrycie ukrytych wad materiałowych. W związku z tym w ramach realizowanych badań podjęto się wykonania badań zmęczeniowych z wykorzystaniem sygnałów

losowych obciążenia wygenerowanych na podstawie gęstości widmowej mocy przedstawionej na rysunku 45.

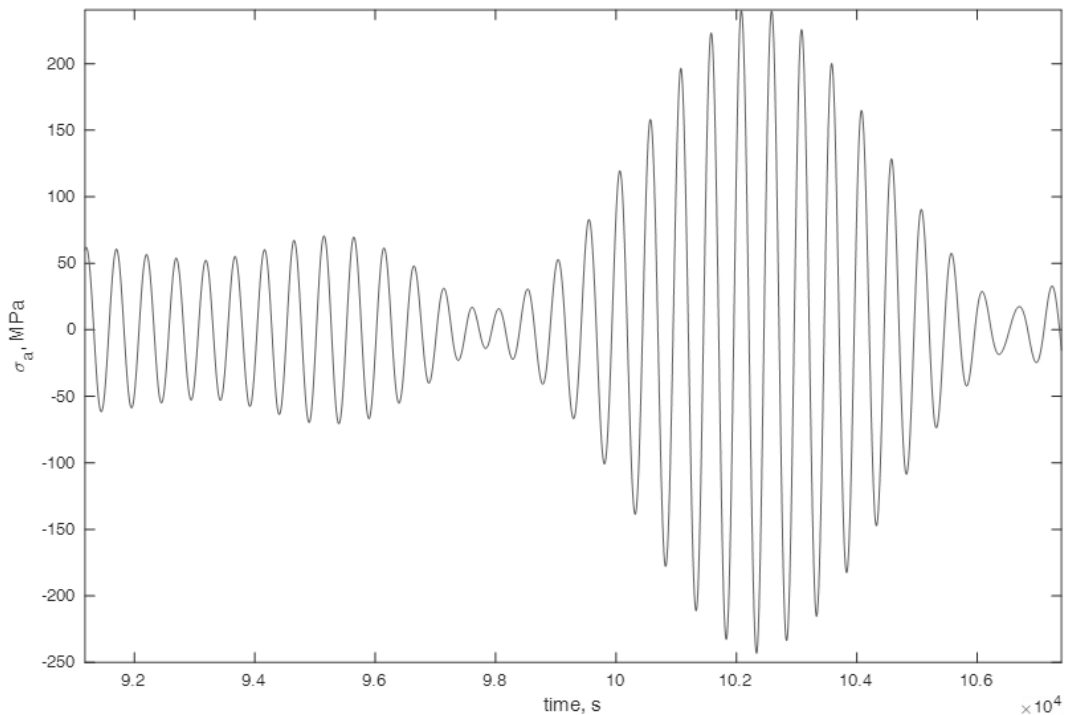
Badania zmęczeniowe z losowym obciążeniem przeprowadzono dla obciążeń według rozkładu gęstości widmowej mocy przedstawionej na rys. 45 oraz współczynnika $m = 2,8$ i $N_0 = 2 \cdot 10^6$ cykli. Przebieg losowy cyklu zmęczeniowego zaprezentowany został na rysunku 46. Wyniki próby zamieszczone zostały w tabeli 12.



Rysunek 45. Rozkład gęstości widmowej mocy wykorzystany w badaniach zmęczeniowych.

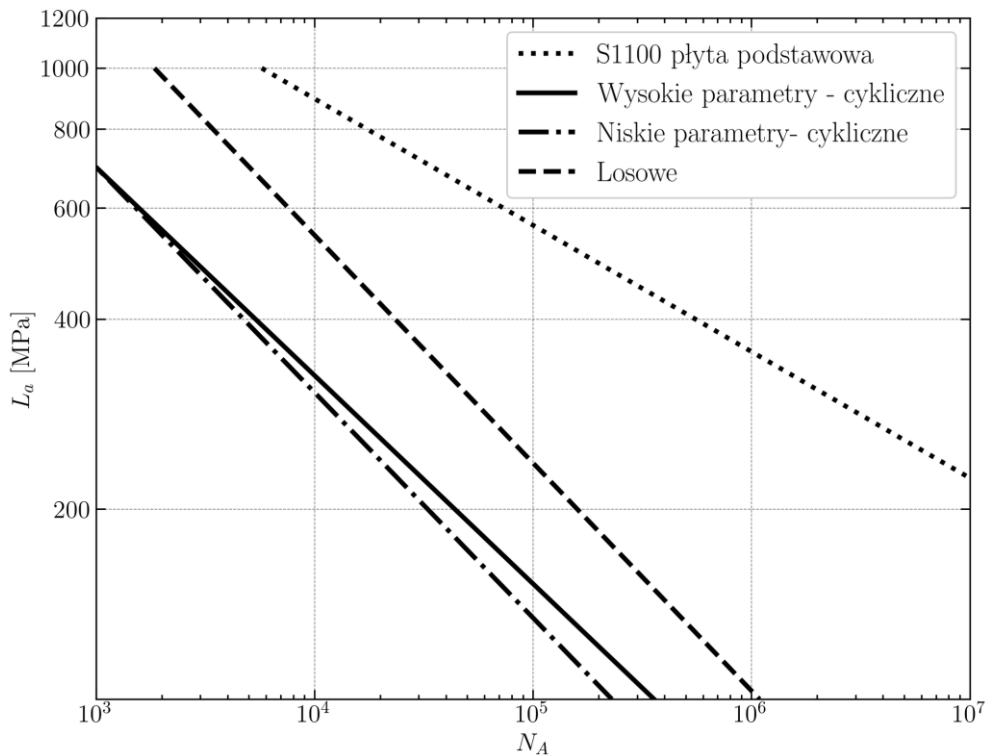
Tabela 12. Wyniki losowych badań zmęczeniowych

Lp.	Złącza spawane S1100QL – spawane metodą 111	
	Wysokie parametry	
	σ_{max} , MPa	N_f
1	500	9510
2	500	14527
3	400	27135
4	400	17763
5	300	60725
6	300	39752
7	200	123714
8	200	188984
9	150	276852
10	150	422915
11	100	1316161
12	100	861597
13	80	2458426
14	80	1609357
15	300	59383
16	200	196363



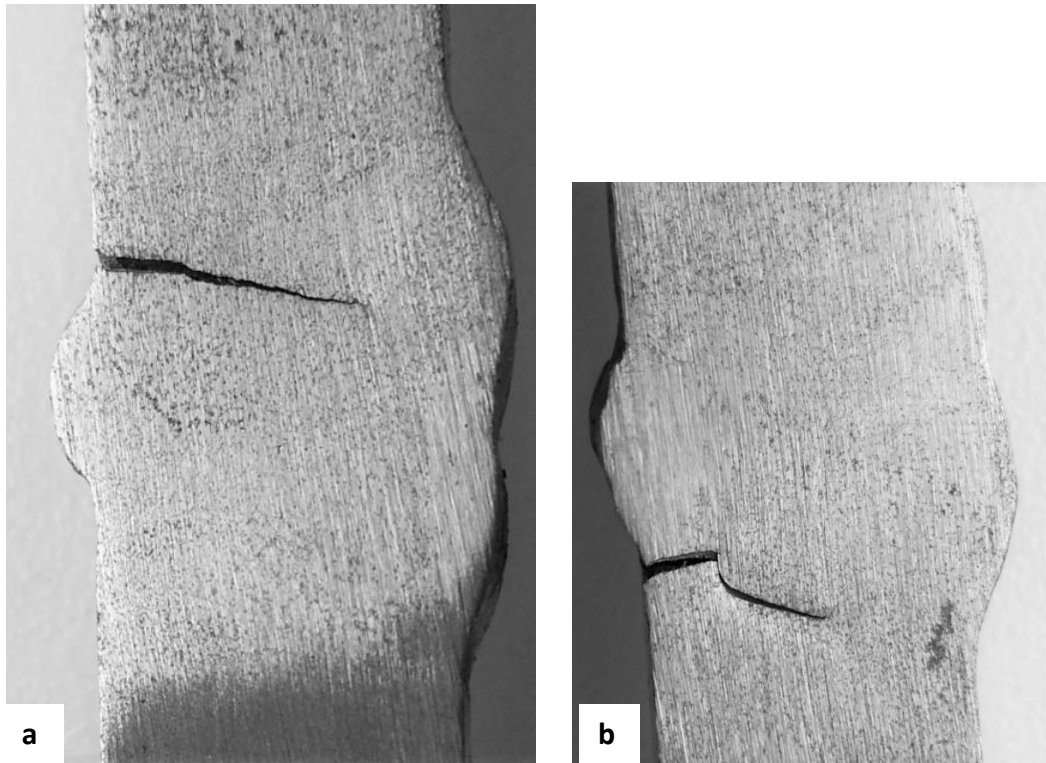
Rysunek 46 Przebieg losowy – badanie zmęczeniowe złącza z stali S1100QL

Na rysunku 47 przedstawiono zestawienie charakterystyk dla cyklicznych badań zmęczeniowych materiału podstawowego i złączy spawanych 2 różnymi energiami z charakterystyką zmęczeniową losowego obciążenia. Jak widać charakterystyka losowa ma znacznie lepszą trwałość niż próbki z obciążeniem cyklicznym. Trwałość dla tej próby plasuje się pomiędzy trwałością dla próbek cyklicznych a materiałem podstawowym. Krzywa charakterystyki jest quasi równoległa do krzywych z badań cyklicznych.

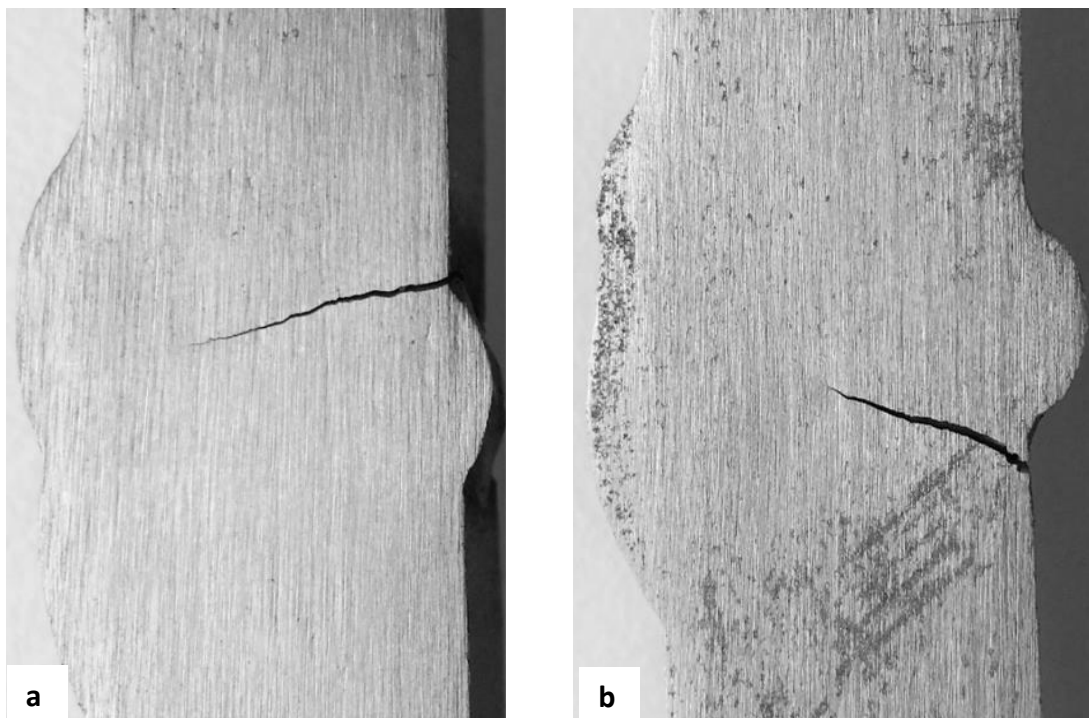


Rysunek 47 Zestawienie charakterystyk z obciążeniem cyklicznym i losowym.

Proces propagacji pęknięcia w przypadku wszystkich próbek następował po stronie grani spoiny. Na trwałość zmęczeniową połączeń mogły wpływać wysokie wartości naprężeń własnych wewnątrz materiału. Na rysunku 48 i 49 zaprezentowano przykładowe pęknięcia zmęczeniowe. Pęknięcia zostały inicjowane w strefie wpływu ciepła po stronie grani i propagowały w głąb materiału. Rozwój pęknięcia nie był jednakowy w wszystkich przypadkach. Na rysunku 48a rozwój pęknięcia widoczny jest quasi prostopadły do powierzchni blachy i przechodzi w głąb spoiny. Na innej próbce spawanej z wysoką energią liniową – rysunek 48b, pęknięcie propaguje prostopadle by następnie zmienić gwałtownie kierunek. Na obu próbkach z złącza spawanego niską energią liniową – rys.49, widoczna jest inicjacja pęknięcia w strefie wpływu ciepła po stronie grani a następnie propaguje poprzez spoinę w głąb materiału.



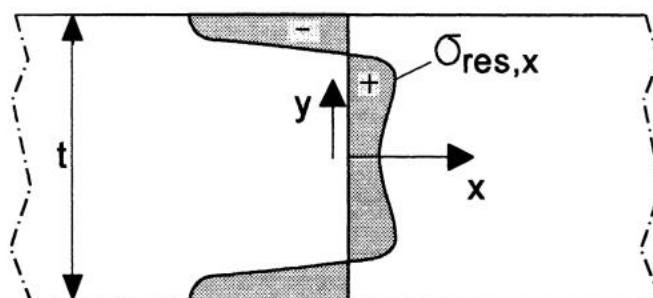
Rysunek 48. Przykładowe pęknięcia po badaniu próbek spawanych „wysokimi parametrami”, pow. 4x



Rysunek 49. Przykładowe pęknięcia po badaniu próbek spawanych „niskimi parametrami”, pow. 4x

8. Badania naprężeń własnych

Naprężenia to z definicji stan fizyczny obiektu w którym przyjmuje się że rozkład naprężeń wewnętrznych w danym elemencie nie został wywołany poprzez obciążenia zewnętrzne [93]. Rozróżniamy naprężenia rozciągające i ściskające które zawsze występują razem. Zakłada się, że jeśli obiekt nie jest obciążony z zewnątrz suma naprężeń rozciągających powinna być niwelowana poprzez naprężenia ściskające. Schematycznie przedstawiono to na rys. 50.



Rysunek 50. Rozkład naprężeń szczątkowych w stanie równowagi [94]

Stan równowagi w elemencie o przekroju prostokątnym można przedstawić za pomocą następującego równania:

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x dy = 0,$$

(12)

gdzie:

t - to grubość materiału, mm,

σ - naprężenia w kierunku, MPa.

Analogicznie sytuacja wygląda z momentami działającymi na układ dwuwymiarowy (Rys. 48):

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y \sigma_x dy = 0 ,$$

(13)

W momencie przyłożenia siły zewnętrznej do elementu, w którym występują naprężenia własne powstanie nowy rozkład naprężeń, który w zakresie odkształceń sprężystych będzie sumą układów:

$$\sigma = \sigma_{zew} + \sigma_{wew} ,$$

(14)

gdzie:

σ_{zew} – rozkład naprężeń wywołany siłami zewnętrznymi, MPa

σ_{wew} – rozkład naprężeń wywołany siłami wewnętrznymi, MPa.

Występowanie naprężeń własnych w materiale może mieć znaczący wpływ na trwałość zmęczeniową. Przy założeniu cyklicznego obciążenia z stałą amplitudą naprężenia σ_a i wartości średniej σ_m to wartość amplitudy pozostanie bez zmian jednak przesunięty zostanie punkt zerowy wartości średniej według równania

$$\sigma_m = \sigma_{m,zew} + \sigma_{res} ,$$

(15)

Naprężenie rozciągające, czyli dodatnie wartości naprężenia średniego σ_m będzie powodować negatywne skutki dla trwałości zmęczeniowej [95]–[97]. Zakładając, że naprężenie własne jest ujemne, czyli ściskające to zmniejszone zostanie średnie naprężenie σ_m co, z kolei jest korzystne dla trwałości zmęczeniowej. Naprężenia ściskające mogą utrudniać otwieranie się mikropęknięć wydłużając czas propagacji tych uszkodzeń.

Rozciągające naprężenia własne będą negatywnie wpływały nie tylko na trwałość zmęczeniową, szkodliwy wpływ będą miały szczególnie na materiały podatne na korozję naprężeniową. W wyjątkowych przypadkach znaczne naprężenia własne mogą powodować deformacje materiałów.

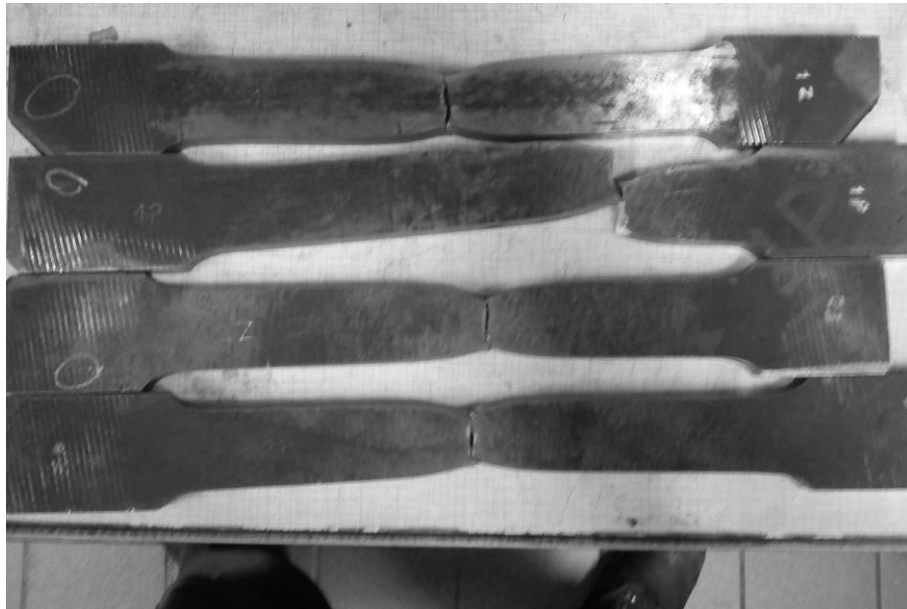
Źródłem wystąpienia naprężeń własnych w materiale można wymienić:

- prace spawalnicze,

- procesy produkcyjne – obróbki skrawaniem, kształtowanie na zimno,
- przeróbki plastyczne,
- obróbki cieplne miejscowe i objętościowe.

Naprężenia własne materiałów można rozpatrywać w skali makro oraz mikro. Deformacje plastyczne w skali mikro nie są jednorodne i ich analiza może pomóc w wyjaśnieniu mechanizmów zmęzeniowych a także efekt Bauschingera.

Na rys. 51 i 52 przedstawiono partię próbek po rozciąganiu, pobrane zostały z blach platerowanych stal-tytan. Jedna z nich, jakiś czas po zerwaniu uległa znacznej deformacji. Po przeprowadzeniu szczegółowych badań na partii blach można było stwierdzić, że wskutek procesu produkcyjnego ulegały one znacznej deformacji i kumulowały duże poziomy naprężenia własnych [96], [98], [99].



Rysunek 51. Deformacja próbki wskutek naprężeń własnych – plater stal – Tytan Gr.1



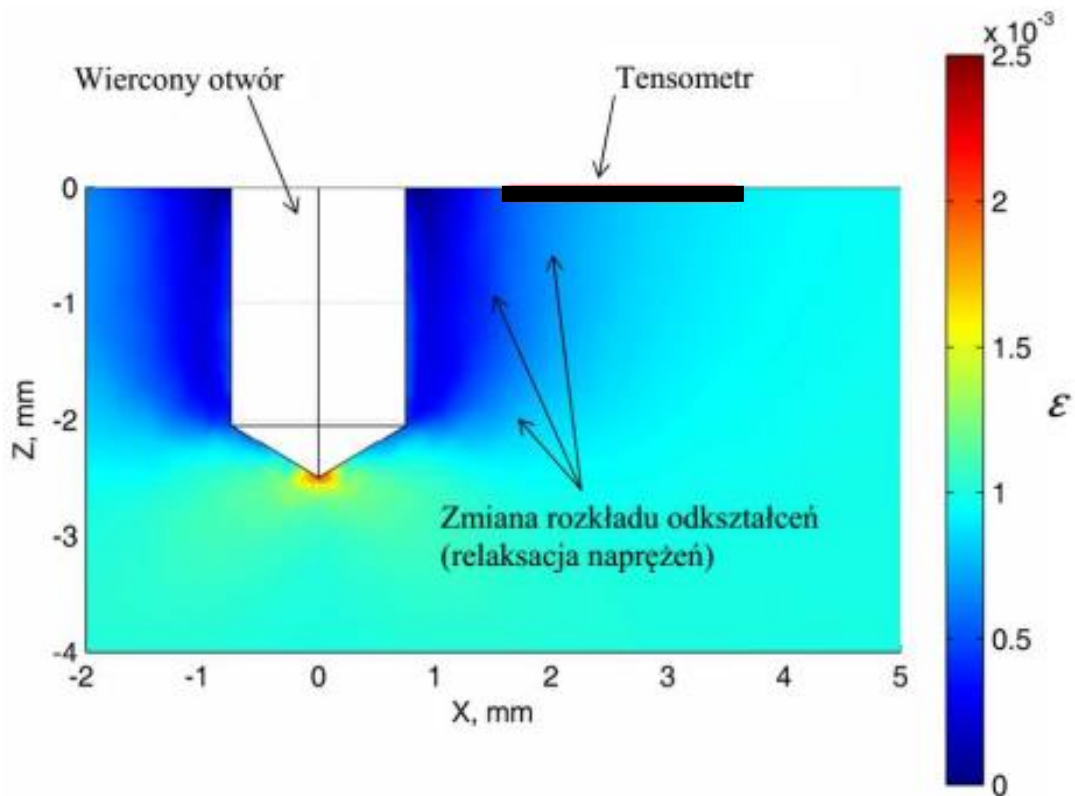
Rysunek 52. Widok szczegółowy – materiały własne

8.1. Metoda trepanacyjna

Istnieje wiele metod pomiaru naprężeń własnych, w literaturze specjalistycznej zostały one podzielone na trzy grupy:

- metody nieniszczące: rentgenowska, magnetyczna ultradźwiękowa oraz neutronowa,
- metody częściowo niszczące, do grupy tej przypisana jest jedynie metoda trepanacyjna,
- metody niszczące: ring core, nawiercania elektroerozyjnego, usuwania warstw.

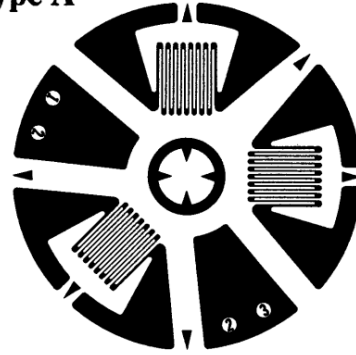
Wymienione techniki pomiaru różnią się pomiędzy sobą w istotny sposób, głównie możliwościami badawczymi (głębokością pomiarów) oraz aparaturą niezbędną do przeprowadzenia pomiarów. Wybrana na potrzeby prezentowanych badań metoda trepanacyjna należy do najtańszych i najłatwiejszych w stosowaniu z powyżej opisanych. Jej mechanizm polega na pomiarze odkształceń wokół stopniowo wierzonego otworu (rys. 53). Zmiana wartości odkształcenia mierzona wokół otworu, przez specjalnie do tego przeznaczoną rozetę tensometryczną (zaznaczano czerwoną linią na rys. 53) jest miarą naprężeń własnych obecnych w materiale.



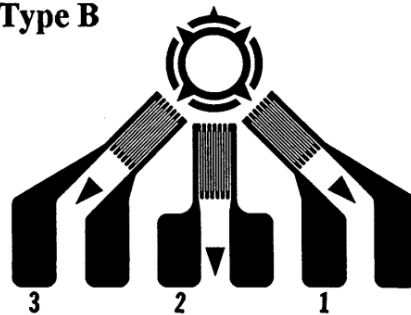
Rysunek 53. Symulacja zmiany stanu odkształcenia podczas pomiarów naprężeń własnych metodą trepanacyjną

Norma ASTM E837 [95] dzieli rozety tensometryczne na trzy standaryzowane typy, które mogą być zastosowane podczas pomiarów. Ich cechą charakterystyczną jest precyzyjnie oznaczony środek geometryczny rozety, w którym wiercony jest otwór pomiarowy (rys. 53 i 54) [95].

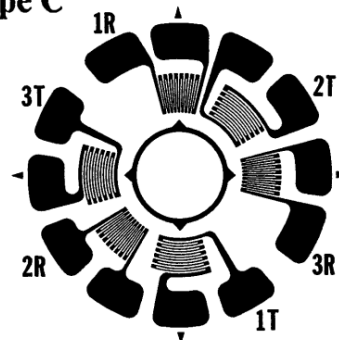
Type A



Type B



Type C



Rysunek 54. Typy rozet tensometrycznych przeznaczonych do pomiaru naprężeń własnych

Norma ASTM [95] oraz opracowania specjalistyczne [96] zalecają wykonanie pomiarów w sześciu podstawowych krokach:

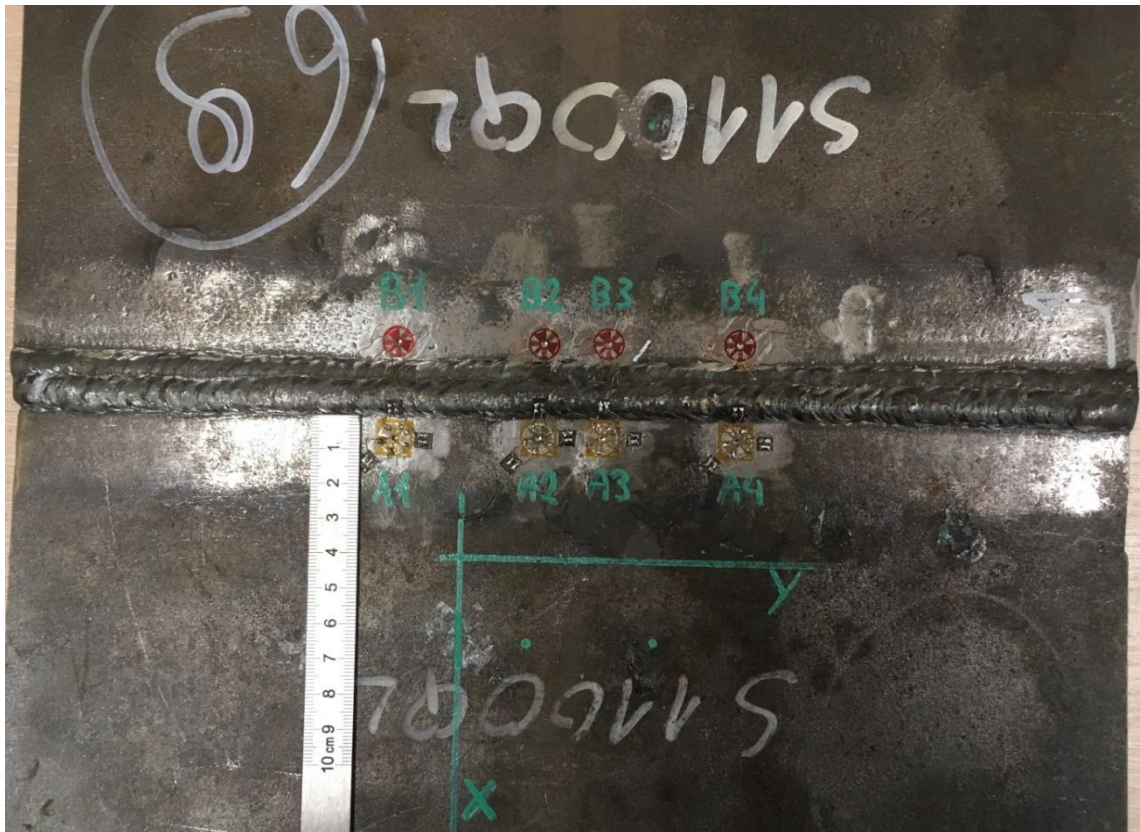
- przyklejenie specjalnej rozety tensometrycznej (3 lub 6 kierunków) w miejscu pomiaru naprężeń własnych,
- podłączenie przyklejonych rozet tensometrycznych do mostka tensometrycznego,
- ustawienie próbki tak, aby wiertło znalazło się w środku geometrycznym rozety,
- ustawienie i wyzerowanie mostka tensometrycznego,

- przeprowadzenie pomiarów odkształceń wokół stopniowo wierconego otworu,
- obliczenie naprężeń własnych.

Przykładowy pomiar metodą wiercenia ślepego otworu zaprezentowano na rys. 55 i 56. Uzyskanie wiarygodnych wyników zależy w dużym stopniu od zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz dokładności ustawiania wiertła względem środka otworu oznaczonego w rozecie tensometrycznej.



Rysunek 55. Wywiercone otwory pomiarowe przez rozetę tensometryczną



Rysunek 56. Seria wywierconych otworów pomiarowych

8.2. Stanowisko pomiarowe

Główne elementy stanowiska pomiarowego wykorzystanego w prezentowanych badaniach to: wiertarka pneumatyczna VPG RS200 (rys. 57) oraz mostek tenzometryczny P3. Ważną cechą wykorzystanej wiertarki jest możliwość bardzo dokładnego ustawienia wiertła, oraz uzyskania równych, co do wartości posuwów w głąb materiału.



Rysunek 57. Wiertarka pneumatyczna RS200

Pomiar odkształceń oraz obliczenia naprężeń własnych wykonano metodą wiercenia otworu zgodnie z normą ASTM. W pomiarach wykorzystano rozety tensometryczne typu A [95] oraz frezy o średnicy nominalnej 1,60 mm. W obliczeniach założono jednorodny rozkład naprężeń. Głębokość wierconego otworu 1 mm.

8.3. Wyniki pomiaru naprężeń własnych

Płyty spawane ze stali S1100QL oznaczone następującymi numerami: 69, 111, 112 zostały poddane pomiarom naprężeń. Przyjęte stałe materiałowe przedstawiono w tabeli 13.

Tabela 13. Stałe materiałowe przyjęte dla gatunku S1100

Materiał	Moduł Younga, E [GPa]	Liczba Poissona, ν [-]
S1100QL	210	0,30

W tabeli 14 przedstawiono odpowiednio wartości maksymalnego i minimalnego naprężenia głównego oznaczone, jako σ_1 , σ_2 oraz kąt β określający kierunek naprężenia σ_1 odmierzany zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara od osi (kierunek prostopadły do linii wtopienia spoiny). Dla każdej płyty dokonano pomiarów w 10 punktach. Lokalizacje punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 55 i 56. Punkty pomiarowe znajdują się w odległości 5-7 mm od linii wtopienia spoiny. Punkty o nume-

rach 1,2,3,4 znajdują się po stronie lica spoiny, natomiast punkty o numerze 5 znajdują się po stronie grani spoiny.

Tabela 14. Naprężenia własne główne σ_1 , σ_2 oraz kąt β dla strony A

Lp.	Płyta 69			Płyta 111			Płyta 112		
	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	β , [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	β , [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	β , [°]
A1	221	-53	85	396	-72	-73	197	8	-69
A2	366	-7	90	371	-30	-67	308	148	-86
A3	400	8	89	329	13	-53	304	96	-85
A4	267	-43	-71	353	-103	-71	290	-10	-62
A5	593	297	89	1081	100	-79	574	103	80
B1	551	-153	-73	105	44	-73	197	44	-73
B2	366	-91	-77	496	-5	81	324	107	-81
B3	385	-76	-79	266	20	61	387	131	-83
B4	425	-149	-78	414	-175	75	192	36	90
B5	852	9	-79	838	-192	87	744	70	-75

8.4. Analiza wpływu naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową złączy spawanych.

8.4.1. Wpływ deformacji na rozkład naprężeń w złączy.

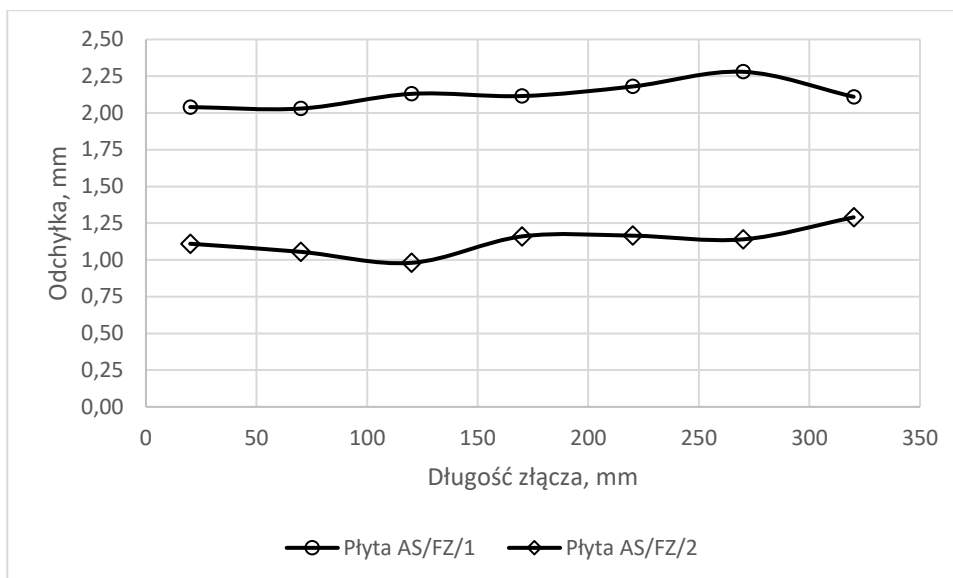
Wskutek procesu spawania do złącza wprowadza się znaczne naprężenia, które mogą negatywnie wpływać na trwałość zmęczeniową. W celu zidentyfikowania poziomu tych naprężeń wykonana została analiza MES. Dla dwóch płyt, widoczne na rysunku 58, zostały wykonane pomiary geometrii złącza i deformacji wynikających z procesu spawania. Te dane posłużyły do dalszej analizy modelowej.



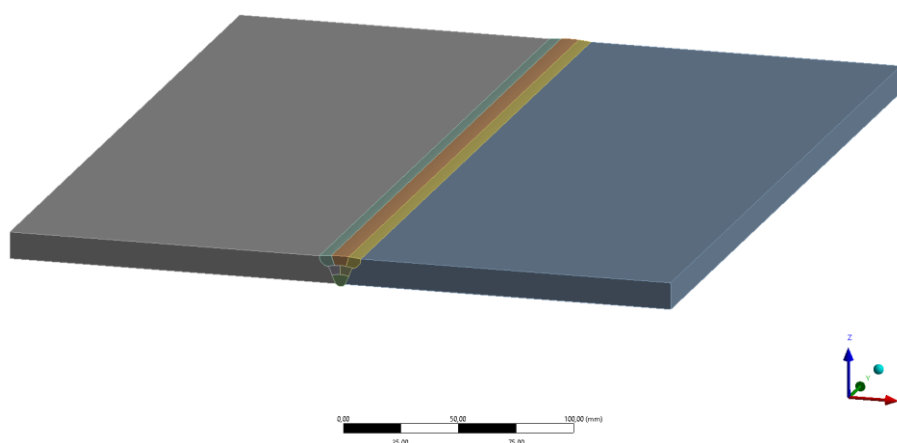
Rysunek 58 Płyty poddane pomiarom geometrycznym

Deformacja płyt była mierzona od miejsca rozpoczęcia procesów spawalniczych. Płyty zostały wykonane metodą MAG blach w gatunku S1100QL o grubości nominalnej 12 mm. Różnica energii liniowej dla płyt wynosiła ok. 0,9 kJ/mm odpowiednio dla płyty 1 wynosiła maksymalnie 0,97 kJ/mm a dla płyty 2 było to maksymalnie 1,88 kJ/mm. Odształcenie mierzono po obu stronach spoiny i nie było stałe na całej długości złącza. Zauważalna jest zmiana pomiędzy skrajnymi punktami płyt – rysunek 59.

Dane te posłużyły do przeprowadzenia symulacji metodą MES w celu wyznaczenia naprężeń własnych wprowadzonych do złącza wskutek spawania – rysunek 60.



Rysunek 59 Odkształcenie płyt na długości złącza

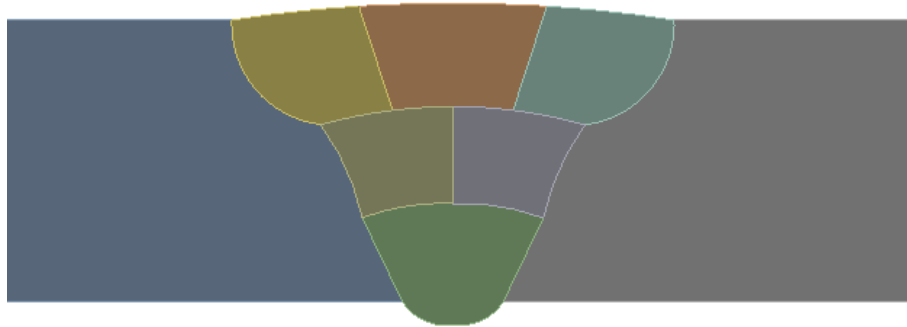


Rysunek 60 Geometria złącza przeznaczonego do analizy MES

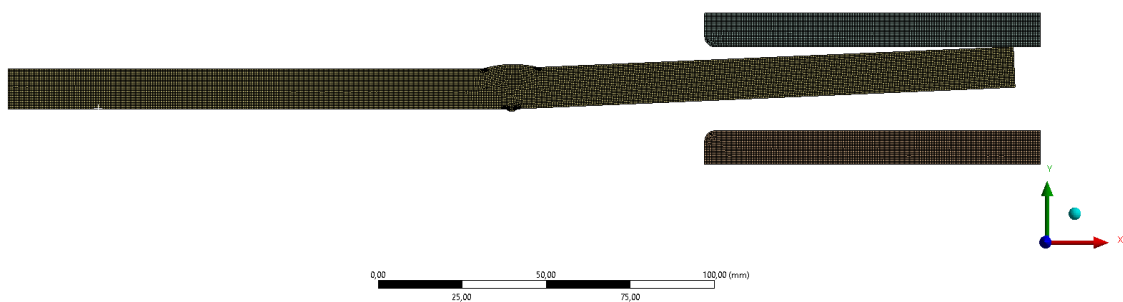
Geometria złącza została zamodelowana w analogiczny sposób w jakiej kolejności były nakładane kolejne ściegi wypełniające spoinę – rysunek 61. W obszarze spoiny wielkość siatki została znacząco rozdrobiona. Spoina, a w szczególności obszar w pobliżu linii wtopienia należy do najbardziej zdegradowanych punktów złącza i w tym obszarze występuje kumulacja naprężeń.

Model ten umożliwił analizę wpływu deformacji wskutek spawania na identyfikację naprężenia rozciągającego-ściskającego zmieniającego naprężenie średnie w trakcie próby zmęczeniowego rozciągania-ściskania. W momencie mocowania próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej próbka ulega prostowaniu, które generuje dodatkowe naprężenie – model obliczeniowy widoczny na rysunku 62.

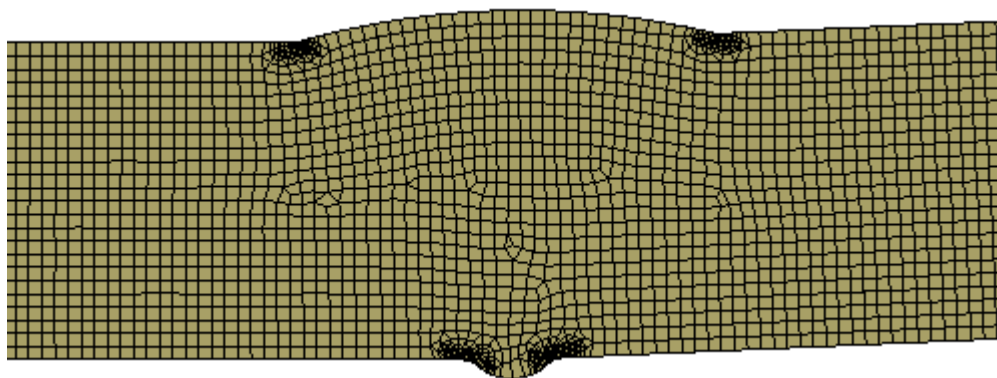
W obszarach linii wtopienia i przejścia z spoiny w materiał bazowy siatka została rozdrobiona do wielkości 0,15 mm. Umożliwiło to bardziej szczegółowe przeanalizowanie rozkładu naprężeń w tym obszarze – rysunek 63.



Rysunek 61 Siatka elementów skończonych spoiny

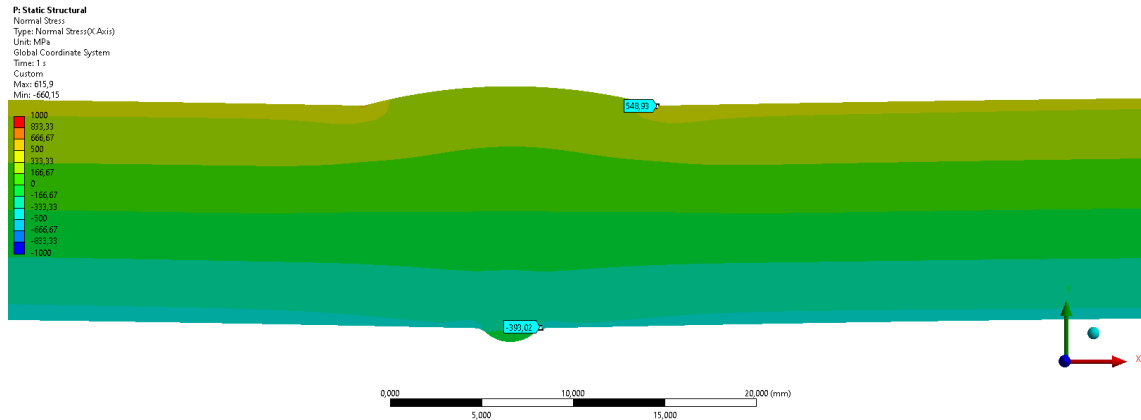


Rysunek 62 Mocowanie próbki w szczękach maszyny wytrzymałościowej z nałożoną siatką MES



Rysunek 63 Model obliczeniowy z nałożoną siatką, widoczne znaczne zagęszczenie w punktach przejścia z spoiny w materiał podstawowy

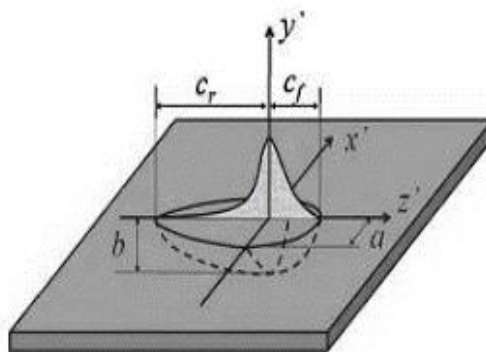
Na podstawie analizy wyznaczono naprężenia normalne w kierunku osi X. Po stronie lica spoiny w linii wtopienia naprężenia rozciągające wynoszą maksymalnie niespełna 550 MPa, z kolei w grani naprężenia ściskające w linii wtopienia przekraczają nieznacznie 390 MPa – rysunek 64.



Rysunek 64 Naprężenia normalne w kierunku X (kierunek rozciągania) po zaciśnięciu próbki w szczękach

8.4.2. Symulacja procesu spawania

Wykorzystując zintegrowane nieliniowe analizy termiczne i mechaniczne metody elementów skończonych wykonano symulację rozkładów naprężeń. Proces spawania złącza oraz jego późniejsze stygnięcie stanowią osobne analizy. każda kolejna analiza jest wykonana wykorzystując wyniki poprzednich wyników symulacji termicznej i mechanicznej i jest powtarzany do ostatniego ściegu. Na rysunku 65 przedstawiono ogólną charakterystykę parametrów analizy a równania 13 i 14 przedstawiają ich definicję.



Rysunek 65 Ogólna charakterystyka parametrów analizy

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_f^2}\right),$$

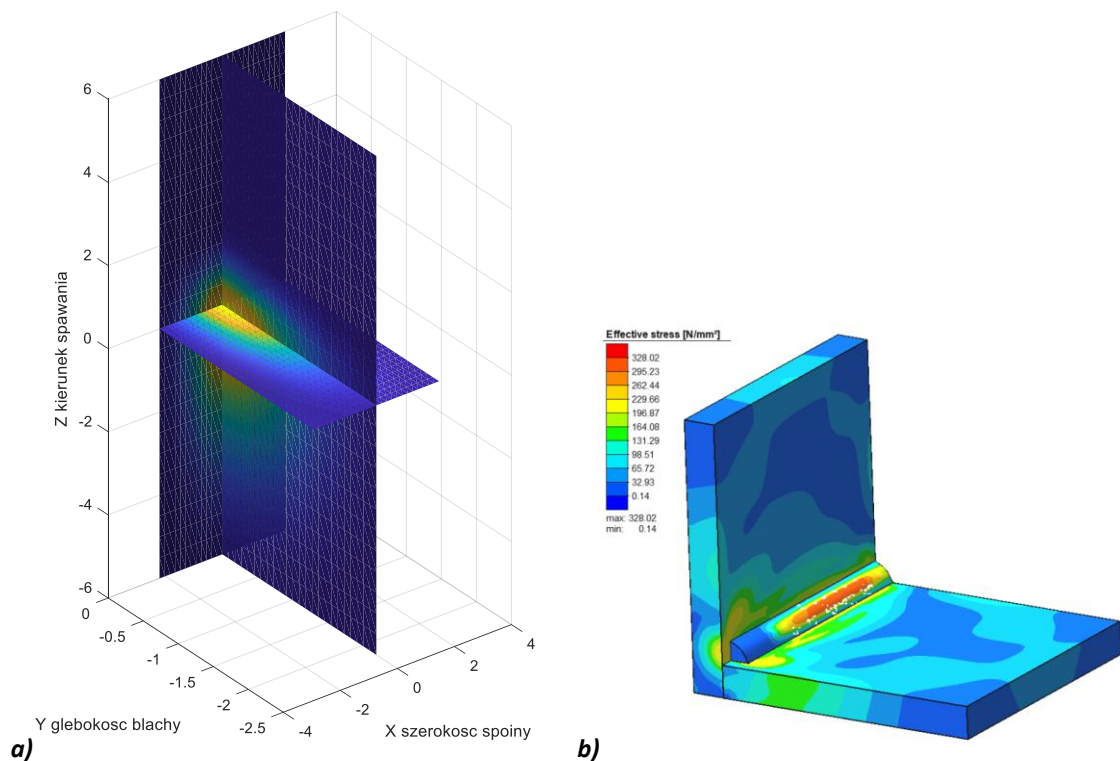
(16)

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_r \pi^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_r^2}\right).$$

(17)

Przyjęty został nieliniowy model materiału oparty o dostępne dane literaturowe i badania własne, z kolei dla umocnienia materiału przyjęto model kinematyczny.

Korzystając z zależności według modelu Goldaka [97], parametry źródła spawalniczego przyjęto dane z pWPS. Z racji, że obciążenie miało charakter wolumetryczny, co umożliwiło rozpatrywanie zjawiska konwekcji i chłodzenie materiału po procesie spawania. W przypadkach, gdy podany był zakres parametrów wybrano wartość środkową. Symulacja prędkości spawania zrealizowana za pomocą powiązania położenia źródła ciepła z wektorem czasu symulacji – rysunek 66.



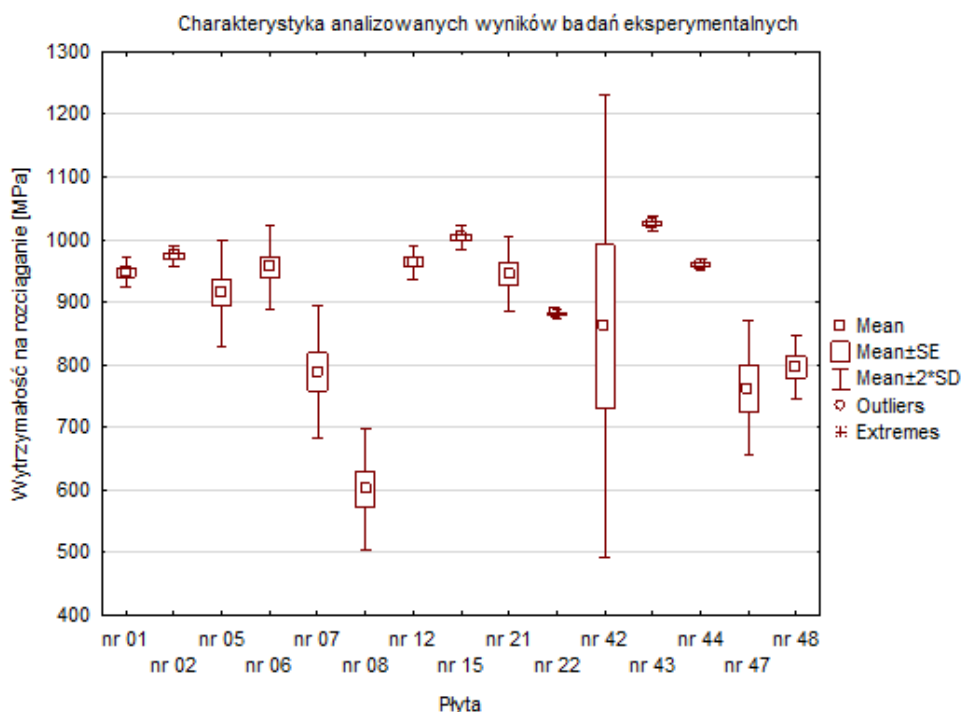
Rysunek 66 Przykładowa reprezentacja wolumetrycznego strumienia ciepła (obciążenie układu)

Spoiny zostały zasymulowane w powiązaniu z kolejnością nakładania określonym w instrukcji spawalniczej (pWPS/WPS). Z tego dokumentu wzięto również warunki brzegowe położenia płyt względem siebie. Średnie wielkości elementów skończonych

płyty przyjęto w zakresie 1 do 3 mm a dla spoiny 1 do 2 mm. Wielkość elementów skończonych dobierano w sposób automatyczny podczas analizy poprzez zastosowanie siatek adaptacyjnych. Tego typu rozwiązanie umożliwiło uzyskanie zadowalającego poziomu zbieżności rozwiązań.

9. Analiza wpływu parametrów spawania na wytrzymałość otrzymanych złączy spawanych

Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych złączy spawanych poddano analizie statystycznej. Analizę wpływu parametrów spawania na właściwości wytrzymałościowe przeprowadzono z użyciem porównania wartości średnich wytrzymałości na rozciąganie. Uwagi oraz pary porównawcze zaprezentowano w tabeli. Porównanie wykonano dla złączy doczołowych o grubości łączonych blach równej 12 mm – rysunek 67. Nie porównywano wytrzymałości złączy wykonanych z blach o grubości 30 ze względu na charakter wykonywanych próbek tzw. „dzielenie próbek”. Ze względu na brak idealnego odwzorowania rozkładów normalnych oraz relatywnie niewielką (standardową) liczebność prób dla poszczególnych płyt we wnioskowaniu statystycznym posłużono się testami nieparametrycznymi. W obliczeniach zastosowano testy Test U Manna-Whitneya dla porównania średnich dwóch grup. Wyniki porównawcze zaprezentowano w postaci wykresu charakteryzującego średnie oraz tablic zawierającej szczegółowe dane testów wraz z uwagami. Wyniki umieszczono w tabelach 15 i 16.



Rysunek 67. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń doczołowych wykonanych z blach o grubości 12 mm wykonanych metodą 135.

Hipotezy dla przeprowadzonych testów zostały postawiona następująco:

- Hipoteza zerowa: „wytrzymałości na rozciąganie obydwu porównanych prób są sobie równe”, czyli nie ma wpływu parametrów spawania na wytrzymałość złącza.
- Hipoteza alternatywna: „wytrzymałość porównywanych płyt jest różna”, czyli istnieją różnice w wytrzymałości złączy wywołane parametrami spawania.

Tabela 15 Analiza wpływu parametrów spawania oraz wytrzymałości złączy spawanych

Materiał	Blachy	Parametry	Wyniki analizy									Uwagi	
S690QL T00695	7, 8	WzPW-NzPW	Mann-Whitney U Test, poziom istotności $p < 0,10000$									2*1 dokł.p	Hipoteza zerowa przyjęta
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N			
			plyta 7	plyta 8				Z	p	plyta 7	plyta 8		
	Wytrzymałość, Rm [MPa]		15,00000	6,000000	0,00	1,745743	0,080857	1,745743	0,080857	3	3	0,100000	
	47,48	Wb-Nb	Mann-Whitney U Test, poziom istotności $p < 0,10000$									2*1 dokł.p	Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N			
			plyta 47	plyta 48				Z	p	plyta 7	plyta 8		
	Wytrzymałość, Rm [MPa]		4,000000	6,000000	1,000000	-0,387298	0,698536	-0,387298	0,698536	2	2	0,666667	
	7,47	WzPW-Wb	Mann-Whitney U Test, poziom istotności $p < 0,10000$									2*1 dokł.p	Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N			
			plyta 7	plyta 47				Z	p	plyta 7	plyta 8		
	Wytrzymałość, Rm [MPa]		10,00000	5,000000	2,000000	0,288675	0,772830	0,288675	0,772830	3	2	0,800000	
8,48	NzPW-Nb	Mann-Whitney U Test, poziom istotności $p < 0,10000$									2*1 dokł.p	Hipoteza zerowa odrzucona	
Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N				
		plyta 8	plyta 48				Z	p	plyta 7	plyta 8			
Wytrzymałość, Rm [MPa]		6,000000	9,000000	0,00	-1,44338	0,148916	-1,44338	0,148916	3	2	0,200000		

Tabela 16. Analiza wpływu parametrów spawania oraz wytrzymałości złączy spawanych c.d.

Materiał	Blachy	Parametry	Wyniki analizy										Uwagi
S890QL	21,43	WzPW - NzPW	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 21	plyta 43	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			6,000000	9,000000	0,00	-1,44338	0,148916	-1,44338	0,148916	3	2	0,200000	
S960QL	42,22	Wb - Nz	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 42	plyta 22	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			5,000000	5,000000	2,000000	0,387298	0,698536	0,387298	0,698536	2	2	1,000000	
S960QL	6,5	WzPW - NzPW	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 6	plyta 5	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			23,00000	13,00000	3,000000	1,299038	0,193932	1,299038	0,193932	4	4	0,200000	
S960QL	1,2	Wb - Nb	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa przyjęta
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 1	plyta 2	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			6,000000	15,00000	0,00	-1,74574	0,080857	-1,74574	0,080857	3	3	0,100000	
S960QL	44,1	WzPW-Nz	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa odrzucona
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 44	plyta 1	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			8,000000	7,000000	1,000000	0,866025	0,386477	0,866025	0,386477	2	3	0,400000	
S1100QL	12,15	Wb - Nz	Mann-Whitney U Test, poziom istotności p <,10000										Hipoteza zerowa przyjęta
	Cecha		Suma rang		U	Z	p	Korygowane		N		2*1 dokł.p	
	plyta 12	plyta 15	Z	p				plyta 7	plyta 8				
Wytrzymałość, Rm [MPa]			6,000000	15,00000	0,00	-1,74574	0,080857	-1,74574	0,080857	3	3	0,100000	

gdzie:

Wb – „wysokie” parametry spawania bez podgrzewania wstępnego,

Nb – „niskie” parametry spawania bez podgrzewania wstępnego,

WzPW – „wysokie” parametry spawania z podgrzewaniem wstępnym,

NzPW – „niskie” parametry spawania z podgrzewaniem wstępnym

10. Wnioski oraz spostrzeżenia

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Stale wysokowytrzymałe są jeszcze niewystarczająco obszernie przebadane pod kątem zmęczeniowym. Normy przedmiotowe nie zawierają wytycznych projektowych dla stali o granicy plastyczności przekraczającej 700 MPa.
- Na podstawie przeglądu literatury wykazano relatywnie niewielką ilość prac, w których zawarto charakterystyki zmęczeniowe w stanach wytężenia innych niż rozciąganie-ściskanie.
- Na podstawie przeglądu literatury dowiedziono, że nieliczne są badania uwzględniające wartość naprężeń własnych spowodowanych procesami spawalniczymi oraz ich wpływ na ogólną trwałość zmęczeniową konstrukcji.
- Połączenia spawane wykonane ze stali S1100QL wykazywały brak różnic w uzyskanych wynikach dla parametrów niskich oraz wysokich bez podgrzewania wstępnego.
- Złącza wykorzystane do przeprowadzenia badań zmęczeniowych charakteryzowały się znaczną deformacją wynikającą z przyjętych parametrów spawania.
- Uwzględniono wpływ deformacji na rozkład naprężeń w spoinie obciążonej na stanowisku pomiarowym.
- Obszar technologiczny związany wykonywaniem połączeń spawanych wykonanych metodą 111 i właściwościami zmęczeniowymi tych złączy jest nieprzebadany.
- Parametry spawania nie wpływają znacząco na wyniki badań zmęczeniowych.
- Parametry spawania nie wpływają na miejsce powstawania pęknięcia i kształtu propagacji pęknięcia zmęczeniowego.
- Proces spawania niezależnie od parametrów wprowadził naprężenia własne do spoiny.

- Pomiar naprężeń wewnętrznych wykonany dla połączeń spawanych, wykonanych z blach stali S1100QL wykazał najwyższe naprężenia wewnętrzne po stronie grani. Co jest również zgodne z mechanizmem rozwoju pęknięć zmęczeniowych zaobserwowanym podczas testów zmęczeniowych.
- W przypadku spoin wielościęgowych parametry pierwszej spoiny różnią się od pozostałych między innymi ilością wprowadzonego ciepła, co w połączeniu z innymi czynnikami może być przyczyną występowania najwyższych naprężeń po stronie grani połączenia.
- Zidentyfikowano wiele czynników mających znaczący wpływ na parametry eksploatacyjne złączy jednak najistotniejsza jest ścisła kontrola parametrów wykonania złącza.
- Zagadnienie wpływu energii liniowej może być przedmiotem dalszych badań w innych konfiguracjach parametrów technologicznych oraz innych stanach naprężenia.
- W przyszłych badaniach podjęte zostaną dalsze prace nad rozszerzeniem ilości przebadanych próbek dla dokładniejszego wyznaczenia charakterystyk.
- Należy poszerzyć wiedzę na temat zjawisk wpływających na mechanizm pęknięcia w stalach wysoko wytrzymałych.

11. Literatura

- [1] „P.Olszowiec, «Syberyjska tragedia. Zmęczenie materiału przyczyną katastrofy» «Energia Gigawat» – nr 4/2010”.
- [2] „Denkschrift über die Einführung einer staatlich anerkannten Klassifikation von Eisen und Stahl”, *Z. Vereines Dtsch. Ingenieure 21 1877*, t. 21, nr 11, s. 518–523, 1877.
- [3] P. Gerster, „MAG-Schweißen hochfester Feinkornstähle im Fahrzeugkranbau”, s. 7.
- [4] „Strenx Sections”. <https://www.ssab.com/en/products/steel-categories/open-sections/products/ssab-cold-formed-strenx-section>, data dostępu 06.06.2022
- [5] „Oszczędzaj dzięki gatunkom PERFORM i N-A-XTRA, XABO Stal perform®”, *Aktualności thyssenkrupp Materials Poland*, 27 października 2020. <https://www.thyssenkrupp-materials.pl/pl/hurtownia-stali/aktualnosci/archiwum/oszczedzaj-dziki-gatunkom-perform-i-n-a-xtra--xabo-112745>, data dostępu 06.06.2022
- [6] „Dillimax”. <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/dillimax/>, data dostępu 06.06.2022
- [7] „Liebherr T284”. [Online]. Dostępne na: https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/640349/IMG_1200x1200/liebherr-T284.jpg, data dostępu 06.06.2022
- [8] *Liebherr LTM 1500-8.1*. [Online]. Dostępne na: https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/600487/IMG_1200x1200/ltm-1500-8.1-frei.jpg, data dostępu 06.06.2022
- [9] *Liebherr LTM 1030-2.1*. [Online]. Dostępne na: https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/1176329/IMG_1200x1200/liebherr-ltm-1030-2-1-frei.jpg, data dostępu 06.06.2022
- [10] „Liebherr 4000 HC 80”. [Online]. Dostępne na: https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/250529/IMG_1200x1200/liebherr-4000hc-80-heavy-load-crane.jpg, data dostępu 06.06.2022
- [11] British Standards Institution, *Eurocode 3: design of steel structures*. London: BSI, 2010.
- [12] British Standards Institution, *Eurocode 3: design of steel structures. Part 1-12 Part 1-12*. London: BSI, 2010.
- [13] „Wiadukt Millau”. [Online]. Dostępne na: <https://www.budowle.pl/files/photos/building/wiadukt-millau-c3b10c2860fd471ce3e70f53bc07e0f0.jpg>, data dostępu 06.06.2022
- [14] „PN-EN 10020 Definicja i klasyfikacja gatunków stali”. PKN.
- [15] S. Prowans, *Materiałoznawstwo*, 2. wyd. Warszawa: PWN, 1984.
- [16] „Dobrzański- Podstawy Nauki o Materiałach i Metaloznawstwo.pdf”.

- [17] „EN ISO 15614-1:2017-08 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -- Badanie technologii spawania -- Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu”. PKN, 1 sierpień 2019.
- [18] „PN-EN ISO 5817:2014-05 Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) -- Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych”. PKN.
- [19] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN ISO 4136 Badania niszczące złączy spawanych metali: próba rozciągania próbek poprzecznych*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.
- [20] „PN-EN ISO 5173 Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -- Badanie na zginanie”. PKN.
- [21] „PN-EN ISO 148-1:2017-02 Metale -- Próba udarności sposobem Charpy’ego -- Część 1: Metoda badania”. PKN.
- [22] „PN-EN ISO 9016 Badania niszczące złączy spawanych metali -- Badanie udarności -- Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie”. PKN.
- [23] „PN-EN ISO 17639:2013-12 Badania niszczące spawanych złączy metali -- Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych”. PKN.
- [24] „PN-EN ISO 9015-1 Badania niszczące złączy spawanych metali -- Badanie twardości -- Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo”. PKN.
- [25] S. Prowans, *Struktura stopów*, 2. wyd. Warszawa: pwn, 2000.
- [26] P. Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN 10025-3 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych Część 3: Warunki techniczne dostawy stalo konstrukcyjnych drobnoziarnistych po normalizowaniu lub walcowaniu normalizującym*.
- [27] G. M. Grigorenko, W. A. Kostin, W. D. Poznjakow, S. L. Żdanow, i W. W. Żukow, „Osobliwości przekształceń strukturalnych w strefie wpływu ciepła złączy spawanych MAG stali wysokowytrzymałej WELDOX 1300”, *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, t. 87, nr 6, cze. 2015, doi: 10.26628/ps.v87i6.349.
- [28] P. Kucharczyk, M. Madia, U. Zerbst, B. Schork, P. Gerwien, i S. Münstermann, „Fracture-mechanics based prediction of the fatigue strength of weldments. Material aspects”, *Eng. Fract. Mech.*, t. 198, s. 79–102, lip. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.09.010.
- [29] Á. Dobosy i J. Lukács, „Welding Properties and Fatigue Resistance of S690QL High Strength Steels”, *Mater. Sci. Forum*, t. 812, s. 29–34, luty 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.812.29.
- [30] E. Brezová, H. Mäsiar, i P. Radič, „WELDING OF HIGH STRENGTH MATERIALS USED IN THE MANUFACTURE OF SPECIAL EQUIPMENT”, t. 8, nr 3, s. 11, 2014.
- [31] H. Wegmann, „Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Bau-stähle im”, s. 8.
- [32] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN 10025-5 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych Część 5: Warunki techniczne dostawy stalo konstrukcyjnych trudnordzewiejących*.

- [33] P. Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN 10025-4 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych Część 4: Warunki techniczne dostawy spawalnych stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych po walcowaniu termomechanicznym*.
- [34] P. Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN 10025-2 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych Część 5: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych*.
- [35] P. Polski Komitet Normalizacyjny, *PN EN 10025-1 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy*.
- [36] Polska i Polski Komitet Normalizacyjny, *PN-EN 10025-6+A1 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Cz. 6: Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [37] P. Kozioł i P. Organek, „Ocena spawalności stali konstrukcyjnych”, s. 5.
- [38] G. M. Grigorenko i W. A. Kostin, „Spawalność stali i kryteria jej oceny”, *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, t. 85, nr 7, lip. 2013, doi: 10.26628/ps.v85i7.214.
- [39] A. Pocica, Politechnika Opolska, i Oficyna Wydawnicza, *Techniki i technologie spawalnicze na ziemiach polskich do 1939 r.* Opole: Politechnika Opolska. Oficyna Wydawnicza, 2015.
- [40] N. De Bernardos i S. Olszewski, „Process of and apparatus for working metals by the direct application of the electric current”, 363,320
- [41] S. Karpinski, J. Z. Moszumanski, i K. Radwan-Wiatrowski, *Laboratorium z podstaw spawalnictwa*. Koszalin: Wydaw. Uczelniane PK, 2001.
- [42] *PN-EN ISO 2560 Materiały dodatkowe do spawania -- Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych -- Klasyfikacja*. PKN.
- [43] *PN-EN 499 Spawalnictwo -- Materiały dodatkowe do spawania -- Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych -- Oznaczenie*. PKN.
- [44] „Pozycje spawania”. ESAB.
- [45] „PN-EN ISO 14341:2021-03 Materiały dodatkowe do spawania -- Druty elektrodowe i stopiwo do spawania łukowego elektrodą metalową w osłonie gazu stali niestopowych i drobnoziarnistych -- Klasyfikacja”.
- [46] „PN-EN ISO 14175 Materiały dodatkowe do spawania -- Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych”.
- [47] P. Kah, H. Latifi, R. Suoranta, J. Martikainen, i M. Pirinen, „Usability of arc types in industrial welding”, *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, t. 9, nr 1, s. 15, grudz. 2014, doi: 10.1186/s40712-014-0015-6.
- [48] „EWM Schweißlexikon”, s. 136.
- [49] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, B. Subcommittee on Welding and Fusing, i American Society of Mechanical Engineers, *ASME boiler & pressure vessel code. an international code Section IX, Section IX*,. 2019.

- [50] E08 Committee, „ASTM E468 Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials”, ASTM International. doi: 10.1520/E0468-11.
- [51] E08 Committee, „Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”, ASTM International. doi: 10.1520/E0466-21.
- [52] „Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)”, ANSI AISC 360. [Online]. Dostępne na: <https://www.aisc.org/products/publication/standards/specification-for-structural-steel-buildings-ansiaisc-360-16/>
- [53] „DIN 50100:2016-12, Schwingfestigkeitsversuch_- Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile”, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2580844.
- [54] „ISO 1099:2017 Metallic materials — Fatigue testing — Axial force-controlled method”, ISO, ISO 1099.
- [55] E08 Committee, „Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing”, ASTM International. doi: 10.1520/E0606_E0606M-21.
- [56] „PN-EN 1090-1 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych -- Część 1: Zasady oceny zgodności elementów konstrukcyjnych”. PKN, 23 listopad 2012.
- [57] W. Schütz, „Zur Geschichte der Schwingfestigkeit”, *Mater. Werkst.*, t. 24, nr 6, s. 203–232, cze. 1993, doi: 10.1002/mawe.19930240605.
- [58] J. Lukács i Á. Dobosy, „Matching effect on fatigue crack growth behaviour of high-strength steels GMA welded joints”, *Weld. World*, t. 63, nr 5, s. 1315–1327, wrz. 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00768-3.
- [59] A. A. Alabi, P. L. Moore, L. C. Wrobel, J. C. Campbell, i W. He, „Tensile behaviour of S690QL and S960QL under high strain rate”, *J. Constr. Steel Res.*, t. 150, s. 570–580, lis. 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.08.009.
- [60] B. Schork *i in.*, „The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength”, *Eng. Fract. Mech.*, t. 198, s. 103–122, lip. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.07.001.
- [61] M. S. Węglowski, „Modern toughened steels – their properties and advantages”, *Biul. Inst. Spaw.*, s. 12.
- [62] A. Klimpel, K. Luksa, Ł. Warcaba, T. Szorek, i A. Kiełbasiński, „Zrobotyzowane spawanie GMA złączy blach ze stali S690 i S960”, *Arch. Technol. Masz. Autom.*, t. 30, nr 3, s. 59–68, 2010.
- [63] J. D. M. Costa, J. A. M. Ferreira, i L. P. M. Abreu, „Fatigue behaviour of butt welded joints in a high strength steel”, *Procedia Eng.*, t. 2, nr 1, s. 697–705, kwi. 2010, doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.075.
- [64] C. Goss, P. Marecki, i K. Grzelak, „Fatigue life of the S960QL steel welded joints”, *Bull. Mil. Univ. Technol.*, t. 63, nr 4, s. 13–19, grudz. 2014, doi: 10.5604/12345865.1131308.

- [65] J. Nowacki, A. Sajek, i P. Matkowski, „The influence of welding heat input on the microstructure of joints of S1100QL steel in one-pass welding”, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, t. 16, nr 4, s. 777–783, wrz. 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.05.001.
- [66] U. Zerbst, M. Madia, M. Vormwald, i H. Th. Beier, „Fatigue strength and fracture mechanics – A general perspective”, *Eng. Fract. Mech.*, t. 198, s. 2–23, lip. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.030.
- [67] U. Zerbst, M. Madia, i B. Schork, „Fracture mechanics based determination of the fatigue strength of weldments”, *Procedia Struct. Integr.*, t. 1, s. 10–17, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.003.
- [68] M. Madia, U. Zerbst, H. Th. Beier, i B. Schork, „The IBESS model – Elements, realisation and validation”, *Eng. Fract. Mech.*, t. 198, s. 171–208, lip. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.08.033.
- [69] M. Dunder, I. SAMARDŽIĆ, A. ĆORIĆ, i G. SALOPEK, „EFFECTS OF REAL WELDING PARAMETERS OF HIGH-STRENGTH S1100QL STEEL ON HARDNESS AND IMPACT ENERGY PROPERTIES”, *METALURGIJA*, t. 57, nr 4, s. 242–244, 2018.
- [70] I. SAMARDŽIĆ, M. Dunder, M. KATINIĆ, i N. KRNIĆ, „WELDABILITY INVESTIGATION ON REAL WELDED PLATES OF FINE-GRAINED HIGH-STRENGTH STEEL S960QL”, *METALURGIJA*, t. 56, nr 1–2, s. 207–210, 2017.
- [71] I. SAMARDŽIĆ, A. ĆORIĆ, i M. Dunder, „WELDABILITY INVESTIGATION OF FINE-GRAINED S1100QL STEEL”, *METALURGIJA*, t. 55, nr 3, s. 453–456, 2016.
- [72] M. Łomozik i E. Turyk, „Mechanical Properties of Welded Joints in Steel S1100QL after Multiple Repair Welding”, *Biul. Inst. Spaw.*, t. 2018, nr 3, s. 7–15, 2018, doi: 10.17729/ebis.2018.3/1.
- [73] M. Amraei, A. Ahola, S. Afkhami, T. Björk, A. Heidarpour, i X.-L. Zhao, „Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels”, *Eng. Struct.*, t. 198, s. 109460, lis. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109460.
- [74] A. Ahola, „On the weld root fatigue strength and improvement techniques for non-load-carrying transverse attachment joints with single-sided fillet welds and made of mild and ultra-high-strength steels”, *Eng. Struct.*, s. 11, 2021.
- [75] B. Möller, J. Baumgartner, R. Wagener, H. Kaufmann, i T. Melz, „Low cycle fatigue life assessment of welded high-strength structural steels based on nominal and local design concepts”, *Int. J. Fatigue*, t. 101, s. 192–208, sie. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.02.014.
- [76] J. Jiang, J. Zhang, J. Liu, S. P. Chiew, i C. K. Lee, „Effect of welding and heat treatment on strength of high-strength steel columns”, *J. Constr. Steel Res.*, t. 151, s. 238–252, grudz. 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.09.027.
- [77] M. St. Węglowski, M. Zeman, i A. Grocholewski, „Effect of Welding Thermal Cycles on Microstructure and Mechanical Properties of Simulated Heat Affected Zone for a Weldox 1300 Ultra-High Strength Alloy Steel”, *Arch. Metall. Mater.*, t. 61, nr 1, s. 127–132, mar. 2016, doi: 10.1515/amm-2016-0024.
- [78] „XABO1100”. Thyssen Krupp.

- [79] „XABO1300”. Thyssen Krupp.
- [80] Polska i Polski Komitet Normalizacyjny, *Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej PN-EN ISO 6892-1*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.
- [81] Polski Komitet Normalizacyjny, *Metale: próba udarności sposobem Charpy'ego. Cz. 1, Cz. 1.* Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
- [82] „Recommendations for welding of XABO 1100”. Thyssen Krupp.
- [83] „Recommendations for welding of XABO 890 & XABO 960”.
- [84] K. Madej i R. Jachym, „Welding of High Strength Toughened Structural Steel S960QL”, *Biul. Inst. Spaw.*, t. 2017, nr 2, s. 6–16, 2017, doi: 10.17729/ebis.2017.2/1.
- [85] S. Błacha, M. S. Węglowski, S. Dymek, i M. Kopyściański, „Microstructural and Mechanical Characterization of Electron Beam Welded Joints of High Strength S960QL and Weldox 1300 Steel Grades”, *Arch. Metall. Mater.*, t. 62, nr 2, s. 627–634, cze. 2017, doi: 10.1515/amm-2017-0092.
- [86] M. Banasik, E. Turyk, i M. Urbańczyk, „Spawanie hybrydowe laser + MAG elementów urządzeń dźwigowych wykonanych ze stali ulepszonej cieplnie S960QL”, *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, t. 89, nr 5, maj 2017, doi: 10.26628/ps.v89i5.759.
- [87] A. Kurc-Lisiecka, J. Piwnik, i A. Lisiecki, „Laser Welding of New Grade of Advanced High Strength Steel STRENX 1100 MC”, *Arch. Metall. Mater.*, t. 62, nr 3, s. 1651–1657, wrz. 2017, doi: 10.1515/amm-2017-0253.
- [88] G. Turichin *i in.*, „Laser-Arc hybrid welding perspective ultra-high strength steels: influence of the chemical composition of weld metal on microstructure and mechanical properties”, *Procedia CIRP*, t. 74, s. 752–756, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.017.
- [89] A. Lange, P. Białucki, W. Derlukiewicz, A. Ambroziak, T. Mach, i M. Zwierzchowski, „Badanie własności złączy ze stali S690QL spawanej metodą MAG”, *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, t. 87, nr 6, cze. 2015, doi: 10.26628/ps.v87i6.345.
- [90] „Produktkatalog. Lasting Connections”. Voestalpine Boehler Welding, styczeń 2019. [Online]. Dostępne na: voestalpine.com/welding
- [91] M. Kowalski, *Zjawiska degradacyjne w bimetalu stal-tytan przy obciążeniach cyklicznych*. Opole, 2014.
- [92] C. Bathias i A. Pineau, *Fatigue of materials and structures: fundamentals*. London; Hoboken, NJ: ISTE, 2010.
- [93] G. E. Totten, M. A. H. Howes, i T. Inoue, Red., *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.
- [94] J. Schijve, *Fatigue of structures and materials*. Dordrecht ; Boston, MA: Kluwer Academic, 2001.

- [95] K. Kluger i T. Łagoda, „New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values”, *Int. J. Fatigue*, nr 66, s. 229–245, 2014.
- [96] A. Karolczuk, M. Kowalski, K. Kluger, i F. Żok, „Identification of Residual Stress Phenomena Based on the Hole Drilling Method in Explosively Welded Steel-Titanium Composite”, *Arch. Metall. Mater.*, t. 59, nr 3, s. 1119–1123, paź. 2014, doi: 10.2478/amm-2014-0195.
- [97] K. Kluger i T. Lagoda, „Fatigue life of metallic material estimated according to selected models and load conditions”, *J. Theor. Appl. Mech.*, nr 51, s. 581–592, 2013.
- [98] A. Karolczuk, M. Kowalski, R. Bański, i F. Żok, „Fatigue phenomena in explosively welded steel–titanium clad components subjected to push–pull loading”, *Int. J. Fatigue*, t. 48, s. 101–108, mar. 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.10.007.
- [99] A. Karolczuk, K. Kluger, M. Kowalski, F. Żok, i G. Robak, „Residual Stresses in Steel-Titanium Composite Manufactured by Explosive Welding”, *Mater. Sci. Forum*, t. 726, s. 125–132, sie. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.726.125.
- [100] „ASTM E837-08 Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain gauge method, (2008)”.
- [101] „Varvani-Farahani A., Fatigue–ratcheting damage assessment of steel samples under asymmetric multiaxial stress cycles, Theoretical and Applied Fracture Mechanics. (2014) w druku, dostępne on–line”.
- [102] J. Goldak, A. Chakravarti, i M. Bibby, „A new finite element model for welding heat sources”, *Metall. Trans. B*, t. 15, nr 2, s. 299–305, cze. 1984, doi: 10.1007/BF02667333.

Streszczenie

W pracy poruszona została tematyka trwałości zmęczeniowej spawanych złączy wykonanych z stali o podwyższonych wytrzymałościach i granicy plastyczności co najmniej równej $R_e=690$ MPa. Złącza zostały poddane badaniom wytrzymałościowym i zmęczeniowym z obciążeniem rozciągająco-ściskającym. Głównym celem pracy było poznanie i identyfikacja właściwości zmęczeniowych i statycznych złączy wykonanych różnymi parametrami spawania.

W części teoretycznej przedstawiony został przegląd literatury uwzględniający badania zmęczeniowe stali o podwyższonych wytrzymałościach. Przybliżone zostały ogólne wytyczne przepisów i norm związanych z projektowaniem i eksploatacją konstrukcji stalowych a w szczególności konstrukcji spawanych. Część teoretyczna została podzielona na obszary: ogólny zawierający zarys historyczny wytwarzania stali wysokowytrzymałych i zarys wymagań badań wytrzymałościowych materiałów podstawowych jak i podstawowe informacje przedstawiające cechy różnych metod spawalniczych, obszar szczegółowy – zawierający publikacje specjalistyczne podejmujące tematykę badań wytrzymałości i zmęczenia materiałów wysokowytrzymałych i złączy wykonanych z ich wykorzystaniem.

W części badawczej zaprezentowane zostały wyniki statycznych badań wytrzymałościowych złączy spawanych i materiałów bazowych oraz charakterystyki zmęczeniowe złączy przy obciążeniu rozciągająco-ściskającym. W podrozdziałach przedstawiono wyniki pomiarów naprężeń własnych oraz przeanalizowano ich wpływ na zjawiska zmęczeniowe zachodzące w złączach.

Abstract:

Durability of welded joints made of high-strength steels - S690QL to S1100QL

This work deals with the fatigue life of welded joints produced from steels with increased strength and yield strength at least equal to $R_e=690$ MPa. The joints were subjected to strength and fatigue tests under tensile-compression loading. The main objective of this study was to identify the fatigue and static properties of joints made with different welding parameters.

In the theoretical part, a literature review was presented, taking into consideration fatigue testing of high strength steels. The discussion focused on general guidelines for regulations and standards related to the design and operation of steel structures, and welded structures. The theoretical part was divided into areas: general – containing a historical outline of the production of high-strength steels and an outline of the requirements for strength testing of basic materials, as well as basic information presenting the characteristics of various welding methods, detailed – that discussed publications dealing with the subject of strength and fatigue tests of high-strength materials and joints that are made using them.

The section based on experimental investigations presents the results of static strength and fatigue tests of welded joints and reference materials as well as fatigue characteristics of joints under tensile-compression loading. The subsections present the results of stress measurements and analyze their influence on fatigue phenomena occurring in the joints.